

# ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного  
технического университета им. Г. И. Носова

№ 1 (13) март 2006 г.

## Машиностроение

Издается с марта 2003 года

### Редакционная коллегия:

#### Главный редактор:

*Б.А. Никифоров* – проф., д-р техн. наук.

#### Заместители:

*Г.С. Гун* – проф., д-р техн. наук;

*М.В. Чукин* – проф., д-р техн. наук (ответственный редактор).

#### Члены редколлегии:

*В.А. Бигеев* – проф., д-р техн. наук;

*М.В. Бушманова* – проф., канд. физ.-мат. наук;

*А.П. Дмитриева* – доц., канд. экон. наук;

*К.Н. Еремин* – проф., д-р техн. наук;

*В.И. Кадошников* – доц., канд. техн. наук (редактор номера)

*В.Н. Калмыков* – проф., д-р техн. наук;

*А.С. Карандаев* – проф., д-р техн. наук;

*В.М. Колокольцев* – проф., д-р техн. наук;

*О.В. Лешер* – проф., д-р пед. наук;

*И.Ю. Мезин* – проф., д-р техн. наук;

*С.И. Платов* – проф., д-р техн. наук;

*В.М. Салганик* – проф., д-р техн. наук;

*А.С. Сарваров* – проф., д-р техн. наук.

© Журнал «Вестник МГТУ им. Г.И.Носова», 2006

#### Адрес редакции:

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Тел.: (3519) 29-85-17

Факс (3519) 23-57-60

E-mail: mgtu@magtu.ru; nis@magtu.ru

Журнал подготовлен к печати Издательским центром  
МГТУ им. Г.И.Носова.

Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ.

Подписано к печати 28.03.2005.

Заказ 144. Тираж 500 экз.



## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Кащенко Ф.Д., Беляев А.И.</i> Реновация деталей металлургического оборудования наплавкой.....	3
<i>Баскакова Н.Т., Куликов С.В., Васильева Н.Ф., Кадошников В.И.</i> Проблемы проведения ремонтов и обновления основных производственных фондов доменного производства .....	6
<i>Кадошников В.И., Кургузов С.А., Кургузов А.С.</i> Исследование утяжки вершин профиля ромбовидного сечения при роликовом волочении с перекосом .....	9
<i>Малышева М.С., Белан А.К.</i> Математическая модель формоизменения металла при поперечном выдавливании.....	11
<i>Белан А.К., Моторыгин М.Е.</i> Влияние межклетевой деформации на скоростной режим прокатки в блоках с групповым приводом .....	14
<i>Усатая Т.В.</i> Проектная деятельность как основной компонент проектного образования в рамках технического университета .....	16
<i>Кадошников В.И., Вдовин К.Н., Куликова Е.В., Кадошникова И.Д., Куликов С.В.</i> Проектирование устройства для подготовки поверхности сердечника механическим способом .....	19
<i>Свистунова Е.А.</i> К вопросу об организации самостоятельной работы в обучении графическим дисциплинам .....	22
<i>Савочкина Л.В.</i> Моделирование учебного процесса на основе применения технических средств .....	25
<i>Паршин В.Г., Белан А.К., Белан О.А., Малышева М.С.</i> Методика определения усилий при поперечном выдавливании .....	27
<i>Москвин В.М., Кадошников В.И., Белевская Е.Л., Данченко Е.А.</i> Напряжения в бандаже опорного вала .....	31
<i>Белан А.К., Кандауров Е.Л.</i> Метод определения рациональных схем прокатки высоких полос в черновых клетях сортовых станов.....	34
<i>Макаров А.Н., Кутлубаев И.М.</i> Синтез структур многодвигательных машин с кинематической развязкой движения основных исполнительных звеньев .....	37
<i>Кудряшов А.А., Решетников Д.А.</i> Диагностирование золотниковых распределителей в гидроприводах металлургического оборудования .....	42
<i>Зайдес С.А., Климова Л.Г., Пронькина С.А.</i> Технологическое управление остаточными напряжениями при охватывающем деформировании .....	44
<i>Ибрагимов Ф.Г., Коковихин А.В., Кандауров Л.Е.</i> Определение остаточной деформации облицовочной планки прокатной клетки с учетом динамических напряжений при ударе .....	48
<i>Тютеряков Н.Ш., Онишин Н.В., Кандауров Л.Е.</i> Влияние высоких температур на изнашивание материалов при абразивном износе .....	50
<i>Онишин Н.В., Тютеряков Н.Ш.</i> Метод определения прогибов линеек валковой арматуры переменного сечения .....	53
<i>Савельева Р.Н., Савельев В.Б.</i> Пути повышения производительности непрерывных травильных агрегатов ЛПЦ-5 .....	55
<i>Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Дудоров Е.А., Резванов С.Б.</i> Влияние вязкости минеральных масел на температурный режим подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов.....	58
<i>Анцупов В.П., Калиниченко С.Н., Анцупов А.В., Завьялов В.И., Подосян А.А.</i> Теоретическое обоснование повышения срока службы подшипниковых узлов роликов первой секции МНЛЗ .....	60
<i>Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С., Артемьев А.В.</i> Трибодиагностика серийного волочильного инструмента и оценка ресурса его работы.....	63
<i>Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С., Мингазов И.Н.</i> Повышение качества волочильного инструмента технологическим обеспечением его выходных параметров .....	65
<i>Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С., Налимова М.В.</i> Теоретические исследования влияния параметров процесса волочения на износ технологического инструмента... ..	68
<i>Огарков Н.Н., Мазур Н.В.</i> Моделирование процесса трещинообразования в поверхностном слое роликов МНЛЗ .....	70
Рефераты .....	75
Сведения об авторах.....	80

УДК 621.797.99

Ф. Д. Кашенко, А. И. Беляев

## РЕНОВАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НАПЛАВКОЙ

Электродуговая наплавка занимает прочные позиции в реновации деталей, машин и механизмов в различных отраслях промышленности. В результате наплавки и при изготовлении деталей можно получить рабочую поверхность, обладающую необходимым комплексом свойств: износостойкостью, термостойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и т.п. При ремонте наплавка позволяет восстановить первоначальные размеры и эксплуатационные свойства деталей. Используя наплавку, можно уменьшить расход дорогостоящих цветных металлов и сплавов и высокоуглеродистых сталей. Кроме того, многократное восстановление изношенных деталей в значительной мере уменьшает расход металла на изготовление запасных частей оборудования. Увеличение срока службы деталей оборудования особенно важно, если от их надежности и долговечности зависит работа высокопроизводительного оборудования, а замена таких деталей связана с длительными простоями агрегатов. Этим обусловлена большая экономическая и техническая эффективность наплавки в металлургическом машиностроении. Номенклатура наплавленных деталей исчисляется сотнями наименований. Вот некоторые из них: конуса и чаши засыпных аппаратов доменных печей, рабочие и опорные валки различных прокатных станов, ножи горячей и холодной резки металла, плунжера гидропрессов, ролики рольгангов, крановые и железнодорожные колеса, тормозные шкивы, ролики машин непрерывного литья заготовок, защитные брони, валки и молотки дробилок, прессовый и штамповочный инструмент, подушки прокатных клетей и ножниц, различные валы, оси и многое другое.

Эффективность реновации наплавкой определяется правильным выбором состава наплавленного металла исходя из условий работы детали и основного вида изнашивания. Выбор наплавочных материалов производится с учетом условий эксплуатации восстанавливаемой детали, вида защиты, конструктивных особенностей детали и имеющегося оборудования.

В настоящее время разработано большое количество электродных материалов на основе железа для дуговой наплавки. Это в основном сплошные и порошковые проволоки и ленты. Их классифици-

руют по различным признакам: по химическому составу, назначению, структуре и т.д. Международным институтом сварки предложена наиболее удобная классификация по химическому составу, которая предусматривает 11 групп наплавочных материалов, представленных в **табл. 1**.

Первые две группы материалов применяют для восстановления валов, осей, корпусных и других деталей из нелегированных или низколегированных сталей. Хромовольфрамовые, хромомолибденовые теплостойкие стали используются для наплавки валков горячей прокатки, ножей горячей резки, прессового и штампового инструмента и других деталей, работающих в контакте с горячим металлом. Вольфрамовые, вольфраммолибденовые быстрорежущие стали предназначены для наплавки металлорежущего инструмента. Низкоуглеродистые хромистые нержавеющие стали рекомендуются для восстановления и упрочнения роликов МНЛЗ, плунжеров гидропрессов и других деталей, работающих при трении металла по металлу. Хромистые стали с повышенным содержанием углерода, легированные вольфрамом, ванадием, молибденом и другими элементами, имеют высокую стойкость против абразивного изнашивания. Высокомарганцевые аустенитные стали рекомендуются для наплавки деталей, подвергающихся абразивному изнашиванию в сочетании с сильными ударами, и применяются для восстановления крестовин стрелочных переводов, деталей дробильно-размольного оборудования, а также для исправления дефектов литья из стали Г13Л. Хромоникелевые и хромоникельмарганцевые нержавеющие аустенитные стали в зависимости от легирования обладают высокой стойкостью в различных коррозионных средах. Для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного, гидро- и газоабразивного изнашивания с ударами различной интенсивности, рекомендуют материалы типа высокохромистых чугунов. Кобальтовые сплавы способны сохранять твердость при высоких температурах, стойки против коррозии и эрозии. Никелевые сплавы с хромом и бором обладают высокой жаропрочностью, кислотостойкостью и износостойкостью.

Каждому типу наплавленного материала может соответствовать несколько конкретных со-

Таблица 1

## Классификация, химический состав и твердость наплавленного металла на основе железа

Тип наплавленного металла	Массовая доля элементов, %									Твердость HRC
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	Mo	Прочие	
Нелегированные и низколегированные стали, содержащие $\leq 0,4\%$ C	$\leq 0,4$	0,5–3,0	$\leq 0,1$	$\leq 3,0$	$\leq 3,0$	–	–	$\leq 1,0$	–	20–45
Нелегированные и низколегированные стали, содержащие $\geq 0,4\%$ C	$\geq 0,4$	0,5–3,0	$\leq 0,1$	$\leq 5,0$	$\leq 3,0$	–	–	$\leq 1,0$	–	52–60
Хромовольфрамовые, хромомолибденовые теплостойкие стали	0,2–0,5	$\leq 2,0$	$\leq 1,0$	1,0–5,0	$\leq 5,0$	1,0–10,0	0,2–1,5	$\leq 4,0$	–	52–60
Вольфрамовые, вольфрамомолибденовые быстрорежущие стали	0,6–1,5	$\leq 0,5$	$\leq 0,4$	4,0–6,0	–	1,5–18,0	$\leq 3,0$	$\leq 10$	Co $\leq 15$	52–60
Низкоуглеродистые хромистые стали	$\leq 0,2$	$\leq 0,8$	$\leq 2,0$	12–30	$\leq 5,0$	–	–	$\leq 2,0$	–	35–50
Хромистые стали с повышенным содержанием C	0,2–2,0	0,3–0,5	$\leq 3,0$	5,0–18,0	$\leq 5,0$	$\leq 1,5$	–	$\leq 2,0$	–	50–60
Высокомарганцевые аустенитные стали	0,5–1,2	11–18	$\leq 4,0$	$\leq 5,0$	$\leq 4,0$	–	–	$\leq 1,0$	–	25–35
Хромоникелевые, хромоникельмарганцевые аустенитные стали	$\leq 0,3$	1,0–8,0	$\leq 5,0$	12–20	8,0–25,0	–	–	$\leq 5,0$	Nb $\leq 1,5$ Ti $\leq 1,0$	18–25
Высокохромистые специальные чугуны	2,0–5,0	0,5–8,0	$\leq 5,0$	18–35	$\leq 4,0$	$\leq 5,0$	$\leq 10$	$\leq 8,0$	Nb $\leq 1,5$ Ti $\leq 1,0$ B $\leq 3,0$ Co $\leq 5,0$	55–65
Кобальтовые сплавы с хромом и вольфрамом	0,7–0,3	–	$\leq 0,4$	25–33	0–3,0	3–25	–	30–70	Fe $\leq 6,0$	42–45
Никелевые сплавы с хромом и бором	$\leq 0,1$	–	2–5	8–18	65–85	–	–	–	Co 1–1,5 B 1–5	54–56

Таблица 2

## Проволока стальная наплавочная сплошного сечения

Марка проволоки	Массовая доля элементов, %						Твердость НВ	Твердость HRC	Типичные объекты наплавки
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Прочие			
Нп-35	0,32–0,40	0,5–0,8	0,2–0,4	$\leq 0,25$	$\leq 0,3$	–	160–220	–	Оси, валы
Нп-45	0,42–0,50	0,5–0,8	0,2–0,4	$\leq 0,25$	$\leq 0,3$	–	160–220	–	Оси, валы
Нп-65Г	0,6–0,7	0,7–1,0	0,2–0,4	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	–	230–310	–	Крановые колеса, опорные ролики
Нп-30ХГСА	0,27–0,35	0,8–1,1	0,9–1,2	0,8–1,1	$\leq 0,4$	–	220–300	–	Крановые колеса, обжимные прокатные валки
Нп-30Х5	0,27–0,35	0,4–0,7	0,2–0,5	4,0–6,0	$\leq 0,4$	–	–	37–42	Валки сортопрокатных станов
Нп-40Х2Г2М	0,35–0,45	1,8–2,3	0,4–0,7	1,8–2,3	$\leq 0,4$	0,8–1,2 Mo	–	54–56	Коленвалы
Нп-5ХНМ	0,50–0,60	0,5–0,8	0,4–0,7	1,8–2,3	$\leq 0,4$	0,15–0,3 Mo	–	40–50	Штампы горячей штамповки
Нп-50Х6ФМС	0,45–0,55	0,3–0,6	0,8–1,2	1,8–2,3	$\leq 0,4$	0,35–0,55 V 1,2–1,6 Mo	–	42–48	Штампы, валки прокатных станов
Нп-30Х13	0,25–0,35	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	12,0–14,0	$\leq 0,6$	–	–	32–38	Плунжеры гидропрессов
Нп-40Х13	0,35–0,45	$\leq 0,8$	$\leq 0,8$	12,0–14,0	$\leq 0,6$	–	–	45–52	Различные ножи, штампы
Нп-45Х4В3Ф	0,4–0,5	0,8–1,2	0,7–1,0	3,6–4,6	$\leq 0,6$	0,1–0,2 W 0,3–0,5 V	–	38–45	Штампы, валки сорто- и листопрокатных станов
Нп-65Х3В10Ф	0,55–0,65	1,3–1,8	0,4–0,7	2,6–3,6	$\leq 0,4$	9,0–10,5 W 0,3–0,5 V	–	42–50	Валки сорто- и листопрокатных станов

Таблица 3

## Проволока стальная сварочная сплошного сечения для наплавки

Марка проволоки	Массовая доля элементов, %					Твердость НВ	Твердость HRC	Типичные объекты наплавки
	С	Mn	Si	Cr	Прочие			
Св-08	≤0,1	0,35–0,60	≤0,03	≤0,15	–	120–160	–	Оси, валы
Св-12ГС	≤0,14	0,8–1,1	0,60–0,90	≤0,2	–	190–220	–	Оси, валы
Св-08Г2С	0,05–0,11	1,8–2,1	0,70–0,95	≤0,2	–	180–210	–	Оси, валы
Св-18ХГС	0,15–0,22	0,8–1,1	0,90–1,20	0,8–1,1	–	240–300	–	Оси, валы
Св-20Х13	0,16–0,24	≤0,3	≤0,3	12,0–14,0	–	–	42–48	Ролики МНЛЗ, плунжеры
Св-10Х17Т	≤0,12	≤0,8	≤0,7	16,0–18,0	0,2–0,5 Ti	–	30–38	Запорная арматура

Таблица 4

## Порошковая проволока для наплавки деталей металлургического оборудования

Марка проволоки	Массовая доля элементов, %						Твердость НВ	Твердость HRC	Типичные объекты наплавки
	С	Mn	Si	Cr	Mo	Прочие			
ПП-Нп-14ГСТ	0,14	0,5	0,6	–	–	0,4 Ti	240–260	–	Оси, валы
ПП-АН198	0,15	0,5	0,5	0,4	–	0,3 Al 0,3 Ti	220–310	–	Оси, валы, крановые колеса
ПП-Нп-18Х1Г1М	0,18	1,4	0,8	1,4	0,4	–	320–380	–	Оси, валы, крановые колеса
ПП-Нп-30Х2Н2Г	0,30	1,5	0,6	1,8	–	1,4 Ni	–	42–48	Оси, валы, коленвалы
ПП-Нп-15Х4ГСМФ	0,15	1,1	0,9	3,7	1,1	0,4 V	–	42–48	Оси, валы, коленвалы
ПП-Нп-15Х13	0,15	0,6	0,8	13,0	–	–	–	38–48	Оси, валы, ролики МНЛЗ
ПП-АН159	0,15	0,6	0,8	13,0	–	–	–	38–48	Ролики рольгангов, МНЛЗ
ПП-АН174	0,12	0,8	0,6	13,0	0,8	1,6 Ni 0,2 V	–	38–48	Ролики рольгангов, МНЛЗ
ПП-Нп-25Х5ФМС	0,25	0,6	1,0	5,0	1,1	0,4 V	–	48–52	Прокатные валки, штампы
ПП-Нп-35В9Х3СФ	0,35	0,9	0,8	3,0	–	9,0 W 0,3 V	–	48–52	Прокатные валки, штампы
ПП-АН105	0,8	13,0	0,4	–	–	3,0 Ni	160–240	–	Ж/д крестовины, литье Г13Л
ПП-Нп-200Х12С1ГРТ	2,0	1,0	1,5	15,0	–	0,7 В 0,6 Ti	–	50–56	Молотки роторных и коксовых дробилок

Таблица 5

## Порошковые ленты для наплавки

Марка ленты	Массовая доля элементов в наплавленном металле, %						Твердость HRC	Типичные объекты наплавки
	С	Mn	Si	Cr	Ti	Прочие		
ПЛ-Нп-10Г2СТ	0,1	2,0	1,0	–	0,2	–	20–26	Оси, валы
ПЛ-Нп-20Х2Г2СТ	0,2	2,0	1,0	2,0	0,7	0,4 Mo	38–45	Оси, валы, ролики
ПЛ-Нп-300Х25С3Н2Г2	3,0	2,0	3,0	25,0	–	2,0 Ni	50–56	Била, зубья ковшей экскаваторов
ПЛ-Нп-120Х22Р3Г2С	1,2	2,0	1,0	22,0	1,0	3,0 В	54–60	– « –
ПЛ-Нп-450Х20Б7М6В2	4,5	–	2,0	20,0	–	2,0 W 7,0 Nb 6,0 Mo	55–62	– « –
ПЛ-Нп-500Х40Н40С2Р	5,0	1,0	2,0	40,0	–	40,0 Ni 0,2 В	50–56	Конуса и чаши ЗА доменных печей
ПЛ-Нп-550Х44Н34ГСР	5,5	0,8	0,8	44,0	–	34,0 Ni 0,3 В	54–62	– « –
ПЛ-Нп-12Х16Н8М6С5Г4Б	0,12	4,0	5,0	16,0	–	8,0 Ni 6,0 Mo 1,0 Nb	38–50	Энергетическая, нефтехимическая арматура
ПЛ-Нп-12Х18Н9С5Г2Т	0,12	2,0	5,0	18,0	0,2	9,0 Ni	27–34	– « –

ставов наплавочных материалов в виде штучных электродов, проволок и лент. Для механизированной наплавки используют сплошные и порошковые проволоки и ленты. Химический состав, твердость наплавленного металла и назначение наиболее распространенных наплавочных и сварочных проволок приведены в табл. 2 и 3.

К сожалению, производство стальных высоколегированных электродных проволок, так необходимых для износостойкой наплавки, является очень трудоемким и экономически невыгодным процессом. Сравнительно просто задача производства высоколегированных электродных материалов для механизированной наплавки решается с помощью порошковой проволоки. По сравнению с проволоками сплошного сечения порошковые проволоки обеспечивают более высокую производительность наплавки и большие возможности для легирования наплавленного металла. В промышленности применяется три типа порошковых проволок: для наплавки под флюсом, в среде защитных газов и открытой дугой. В табл. 4 приведены составы и назначение наиболее распространенных порошковых проволок, разработанных в Институте электросварки им. Е.О. Патона (Украина).

Кроме порошковых проволок широко применяют порошковые ленты. Наплавка электродной лентой по сравнению с наплавкой электродной проволокой имеет ряд преимуществ, основными из которых являются высокая производительность и малая глубина проплавления основного металла. Ввиду того, что холоднокатаные (сплошного сечения) ленты могут быть изготовлены только из пластичных деформируемых сплавов с небольшим содержанием углерода, то они не в полной мере удовлетворяют разнообразным требованиям, предъявляемым к наплавленному металлу. Этих недостатков лишены порошковые ленты, которые изготавливают на специальном оборудовании, снабженном дозирующими устройствами и роликами для формирования и завальцовки ленты-оболочки, а также уплотнения шихты порошковой ленты. Характерной особенностью порошковых лент является их универсальность. Ленты позволяют вести наплавку под флюсом и открытой дугой. В табл. 5 приведены химические составы и назначение порошковых лент, которые рекомендуются для восстановления и упрочнения деталей металлургического оборудования.

УДК 338.51

Н. Т. Баскакова, С. В. Куликов, Н. Ф. Васильева, В. И. Кадошников

## ПРОБЛЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ РЕМОНТОВ И ОБНОВЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФОНДОВ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Любое промышленное предприятие, работающее в условиях рыночной экономики и конкуренции, для поддержания высокого рейтинга на рынке требует постоянного обновления орудий и средств труда.

Существующие направления воспроизводства основных производственных фондов (ОПФ) включают: новое строительство, разные формы обновления ОПФ, такие как реконструкция, техническое перевооружение, расширение и модернизация, а также при необходимости диверсификация производства в целом или отдельных подразделений, цехов, участков предприятия.

В условиях российских металлургических предприятий, имеющих высокий уровень фондоёмкости продукции, одной из основных составляющих общей конкурентной стратегии будет стратегия обновления основных производственных фондов. Целью данного стратегического

направления является снижение себестоимости металлопродукции за счет оптимизации и снижения уровня затрат на ремонт на основе вновь введенных основных производственных фондов.

В современных условиях хозяйствования формирование затрат на ремонт ОПФ и оценка их эффективности важны для оптимизации планирования и бюджетирования себестоимости металлопродукции в целом. Необходимость определения отличий между разными формами возмещения частичного (капитальный ремонт) и текущего износа ОПФ (текущий ремонт и текущее обслуживание) связана с потребностью определения их однозначной стоимостной оценки, которая используется при существующей форме плановых ремонтов.

Доменное производство – достаточно сложный процесс, требующий большого количества специфического оборудования, учитывающего особен-

ности технологического процесса, большую производительность печей и высокие температурные режимы процесса. Количество капитальных ремонтов доменных печей, в отличие от других видов основного технологического оборудования сталелитейного и прокатного производства, включает три разряда ремонтов, в зависимости от срока эксплуатации печей. Капитальный ремонт 1 разряда продолжительностью от 60 до 90 сут. предполагает капитальный ремонт с выпуском из горна жидких продуктов плавки полностью, со сменой всей огнеупорной футеровки, с ревизией и ремонтом всего оборудования и конструкций. Капитальный ремонт 2 разряда продолжительностью от 18 до 20 сут. предполагает средний ремонт со сменой огнеупорной футеровки шахты и заплечиков, с ревизией и ремонтом оборудования фурменной зоны в верхней части горна, включая холодильники и вспомогательное оборудование. Капитальный ремонт 3 разряда продолжительностью до 3 сут. предполагает смену засыпного устройства и ремонт колошниковой защиты.

Также следует учитывать, что чем выше срок эксплуатации используемого оборудования, тем большие затраты несет предприятие на поддержание его в работоспособном состоянии. Анализ количества капитальных ремонтов доменных печей ОАО «ММК» за 1934–2005 годы позволяет сделать вывод о том, что с увеличением срока эксплуатации доменных печей требуется боль-

шее количество капитальных ремонтов по всем разрядам при одновременном сокращении межремонтного периода (рис. 1).

Анализ затрат на ремонт оборудования доменного цеха за 2003–2005 гг. свидетельствует об увеличении расходов на различные виды ремонтов более чем в 3 раза (рис. 2, 3).

Высокие затраты на текущий ремонт доменных печей приближаются по стоимости к затратам на капитальный ремонт 3 разряда. При проведении капитального ремонта 3 разряда затраты на его выполнение планируются как затраты на текущий ремонт доменных печей, что требует более строгой классификации и детализации работ по каждому виду ремонтов и межремонтного обслуживания.

Специфика производства требует постоянного поддержания неснижаемого запаса запасных частей для ремонта механического оборудования доменного цеха, который на ОАО «ММК» в среднем составляет 15–20% стоимости затрат на ремонт.

При этом затраты на запасные части, металлоконструкции и другие изделия УГМ составляют 50–60% от стоимости ремонтов (рис. 4).

Определение эффективности обновления и выбор оптимального варианта приведут к снижению не только капитальных, но и эксплуатационных издержек. Это связано с тем, что предприятие стоит перед выбором: или осуществить приобретение нового оборудования, или выполнить

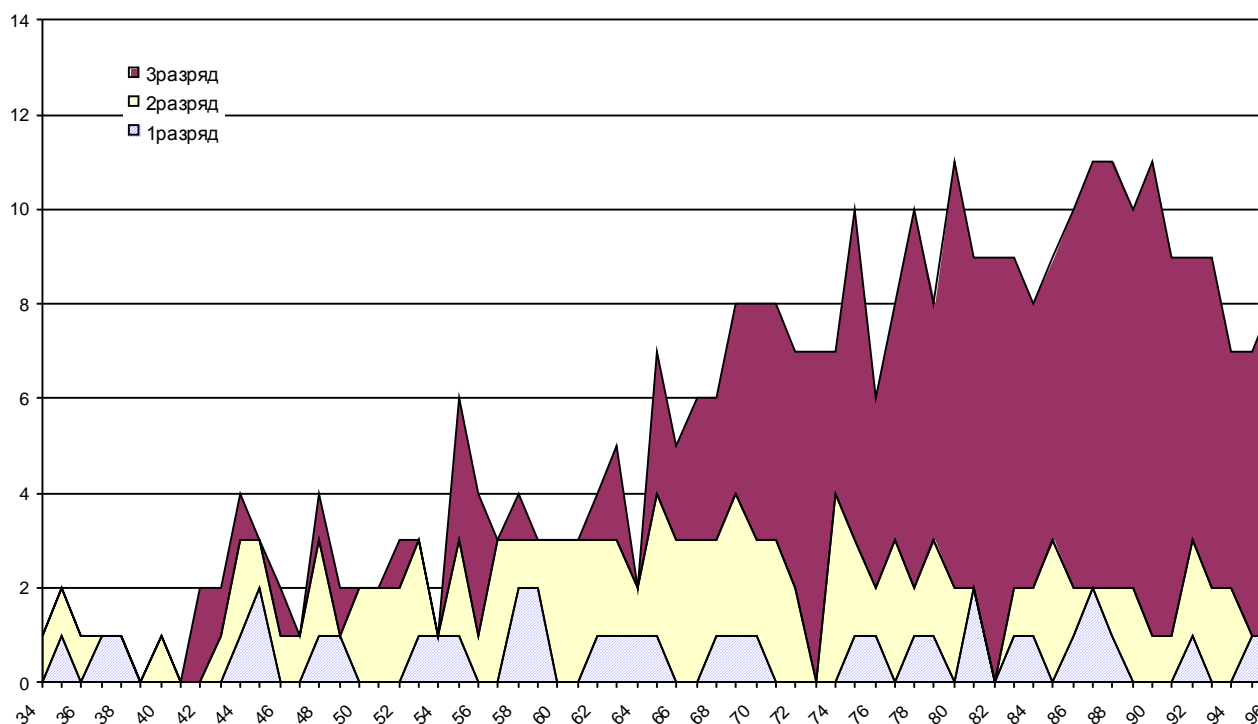


Рис. 1. Количество капитальных ремонтов доменных печей ОАО ММК за 1934–2005 годы

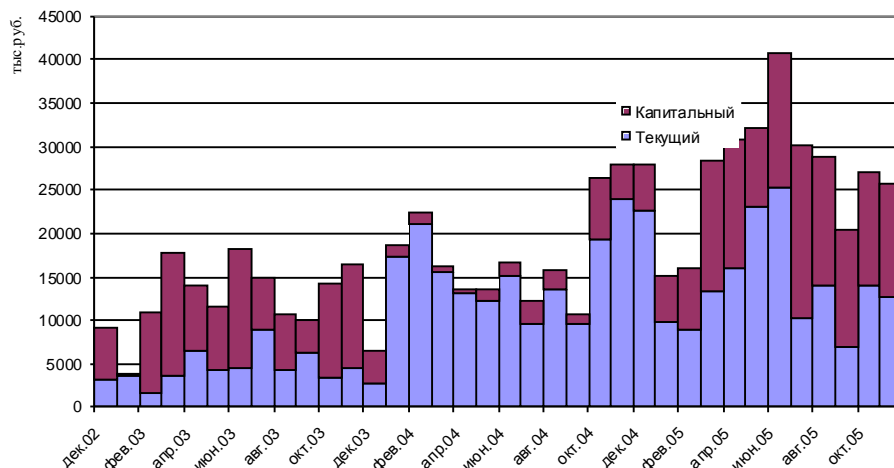


Рис. 2. Затраты на ремонты по доменному цеху ОАО «ММК» за 2003–2005 годы

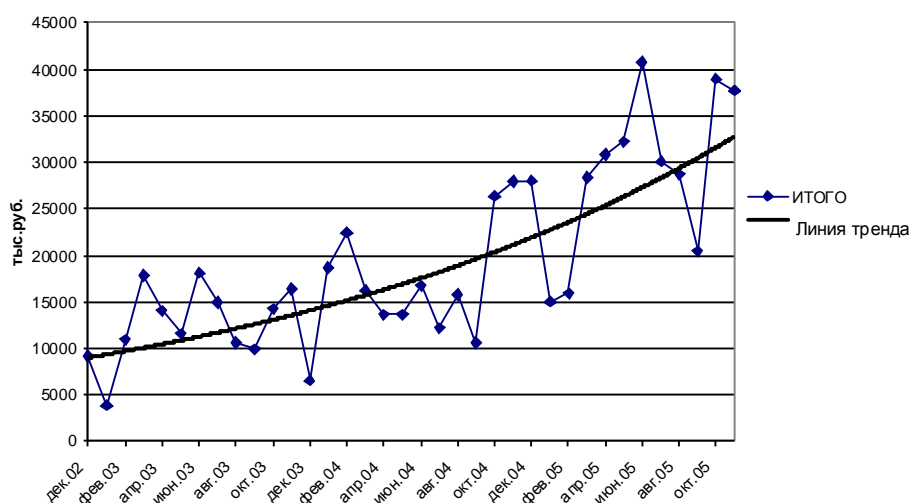


Рис. 3. Динамика суммарных затрат на ремонты ОПФ доменного цеха ОАО «ММК» за 2003–2005 годы

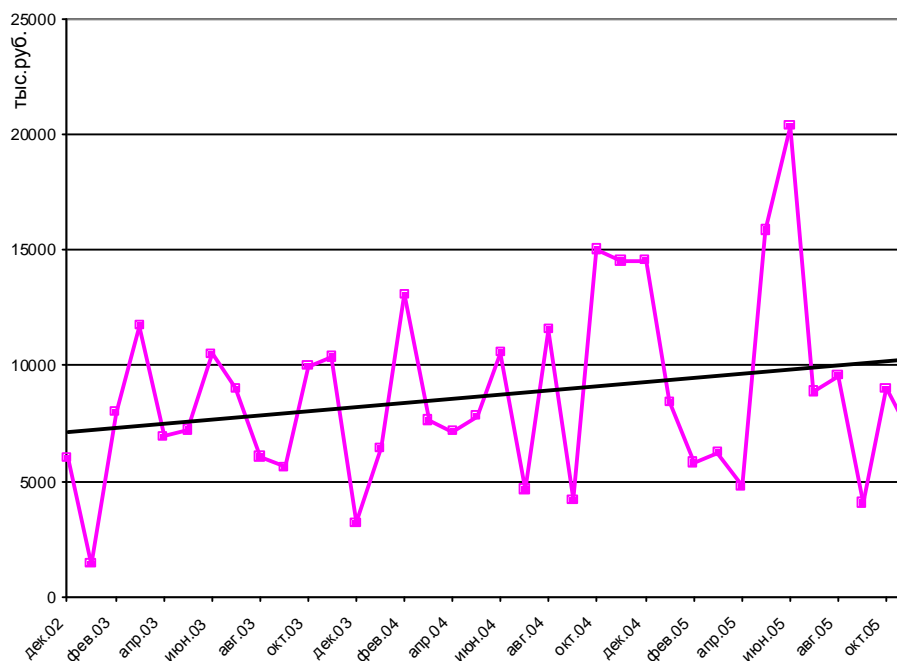


Рис. 4. Динамика затрат на запасные части по доменному цеху ОАО «ММК» за 2003–2005 годы



реконструкцию или иные формы обновления ОПФ вместо проведения последнего в ремонтном цикле капитального ремонта, или выполнить капитальный ремонт с элементами модернизации ОПФ. То есть сопоставление и выбор вариантов текущих затрат или капитальных вложений напрямую зависит от их правильной стоимостной оценки ОПФ.

В настоящее время процесс воспроизводства ОПФ организован так же, как и при плановой экономике: приобретение – амортизация в течение нормативного срока службы и накопление амортизационного фонда для возмещения полного износа – ремонт и межремонтное обслуживание на основе плано-предупредительных ремонтов для возмещения частичного и текущего износа – приобретение новых ОПФ.

Такая организация воспроизводственного процесса не учитывает ни инфляционных процессов, ни эффективности разных форм обновления ОПФ, ни способа возмещения износа. В условиях рынка организация воспроизводственного процесса должна быть совершенной иной, основанной на постоянной оценке эффективности того или иного способа воспроизводства основных производственных фондов и способа возмещения износа, что в конечной степени обусловит снижение затрат, связанных с приобретением и эксплуатацией ОПФ.

Принятая в настоящее время в налоговом учете РФ система начисления износа ОПФ основана на достаточно простом линейном методе начисления амортизации, который формирует износ, исходя из ожидаемого срока его производственного

использования. Данный метод позволяет включить износ ОПФ в состав себестоимости продукции, уменьшив текущую балансовую стоимость ОПФ, и накопить денежные средства, достаточные для приобретения новых ОПФ вместо изношенных. Однако полученных средств на приобретение новых ОПФ для возобновления воспроизводственного процесса явно недостаточно из-за происходящих инфляционных процессов.

Определение верхней и нижней границ индексации стоимости каждого вида ОПФ должно строиться на основе оптимизации прибыли, исходя из минимально допустимого срока выпуска продукции при допустимых объемах производства или сроках окупаемости продукции.

Выбор вариантов должен осуществляться на основе расчета приведенных затрат и их эффективности с учетом дисконтирования капитальных затрат и ограничения финансовых ресурсов и собственных и заемных источников финансирования затрат.

Оценка эффективности также должна обеспечивать необходимый набор данных для ответа на вопрос, отражает ли деятельность предприятия интересы и ожидания всех заинтересованных лиц. Поэтому анализ эффективности тесно связан с усовершенствованием самой системы управления с использованием таких методов, как: разработка системы показателей; метод сравнения при помощи построения аналитических таблиц; метод средних величин; метод группировки; индексный метод; методы регрессионного анализа; имитационное моделирование; методы ситуационного анализа и прогнозирования.

УДК 621.771

В. И. Кадошников, С. А. Кургузов, А. С. Кургузов

## ИССЛЕДОВАНИЕ УТЯЖКИ ВЕРШИН ПРОФИЛЯ РОМБОВИДНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ РОЛИКОВОМ ВОЛОЧЕНИИ С ПЕРЕКОСОМ

Увеличение прочности и несущей способности, а также восстановления резьбовых соединений возможно с помощью спиральных резьбовых вставок [1]. Поэтому разработка технологии изготовления таких деталей является актуальной.

Резьбовые вставки делают из проволоки фасонного, ромбовидного сечения. Одним из требований к сечению фасонной проволоки является различие по величине радиусов скруглений острых вершин (рис. 1). Это обусловлено параметрами резьбового соединения (рис. 2) [2].

Выполнение данного требования возможно изготовлением либо соответствующего несим-

метричного калибра, либо путём изменения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при волочении через роликковую волоку путем её перекоса относительно оси волочения. Вторым вариантом мы считаем более перспективным. Для определения величины перекоса, позволяющего обеспечить необходимые по величине радиусы скруглений, был спланирован и реализован эксперимент.

Спроектирована и изготовлена двухроликковая волока (рис. 3).

Двухроликковая волока состоит из корпуса 3, в который вставляются подушки 5. Ролики 4

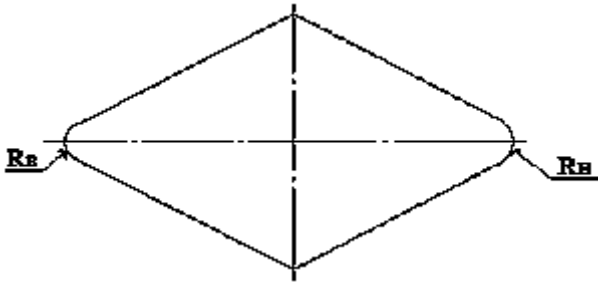


Рис. 1. Сечение ромбовидного профиля

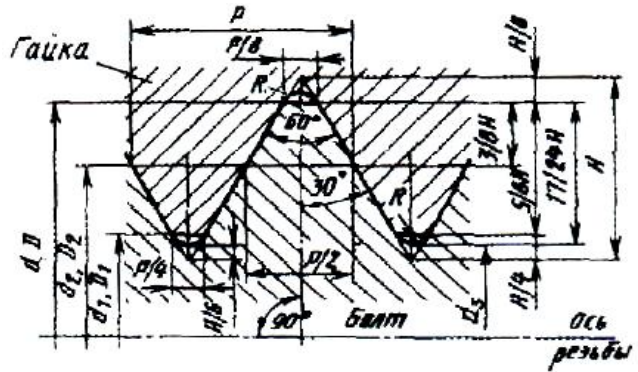


Рис. 2. Резьба метрическая

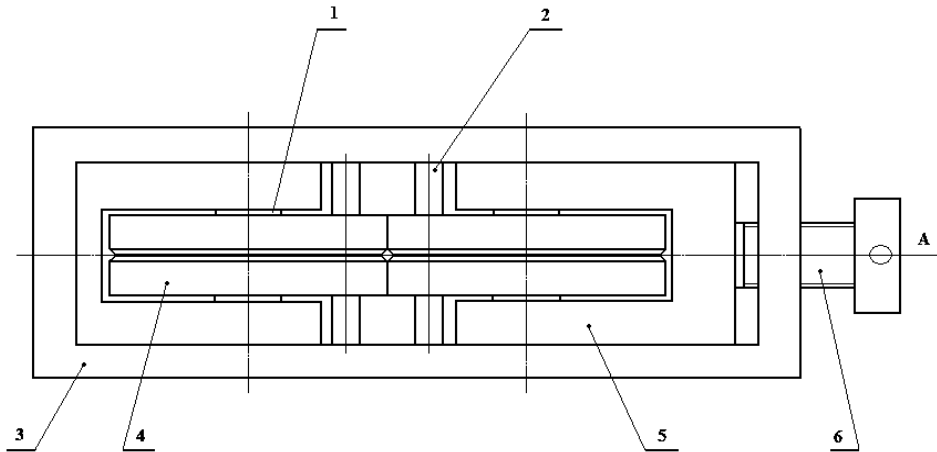


Рис. 3. Волока двухроликовая:

1 – ось; 2 – втулка; 3 – основание; 4 – ролики; 5 – подушки; 6 – болт

вращаются в двухрядных роликовых подшипниках, установленных на осях 1. Для осевой фиксации роликов использованы направляющие элементы 2. Валки сводятся с помощью винта 6. На валках диаметром 160 мм нарезаны треугольные, симметричные относительно бочки вальки с углом выхода на бочку  $\alpha=30^\circ$  (см. рис. 3). Ручьи позволили получить заданный симметричный ромбовидный калибр с углами при вершине  $60^\circ$  и с заданными линейными размерами, обеспечивающими изготовление профиля для получения резьбы с шагом 4 мм.

Волоку устанавливали на волочильный блок с возможностью перекоса относительно оси А. Угол перекоса определяли с помощью угломера с точностью  $2^\circ$ . На проволоочных с различными углами перекоса образцах были измерены радиусы скруглений острых вершин ромбовидного сечения на большом инструментальном микроскопе.

Анализ размеров поперечного сечения профиля показал, что увеличение угла перекоса волоки приводит к изменению радиусов при ост-

рых вершинах получаемого профиля. Это обусловлено большими по величине растягивающими деформациями у «наружной» вершины по сравнению с деформациями у «внутренней» вершины.

На фотографии (рис. 4) представлено сечение одного из полученных образцов. На нем явно выражены скругления при вершинах острых углов ромба.

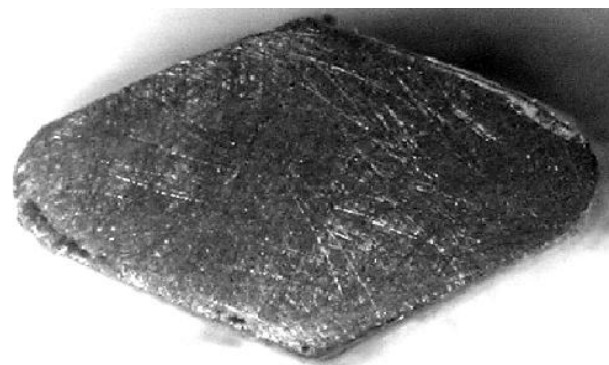


Рис. 4. Поперечное сечение ромбовидного профиля

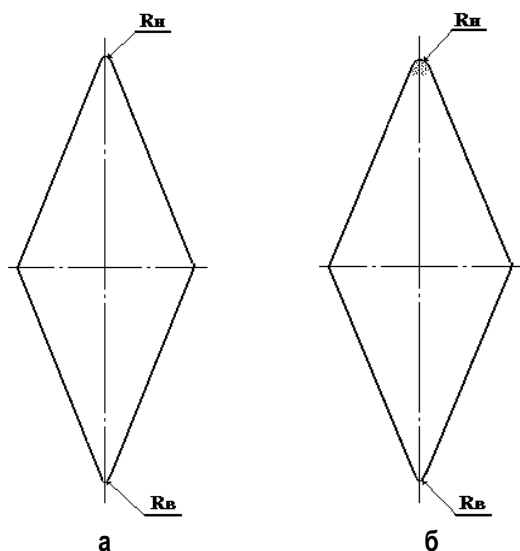


Рис. 5. Изменение острых вершин профиля сечения при увеличении угла наклона волокна

Это является результатом того, что при повороте волокна относительно оси волочения верхние углы ромба недозаполнились: произошло перераспределение металла по сечению профиля. Вследствие этого сформировались скругления вершин сечения.

На рис. 5 приведены результаты замеров изменения «наружного» и «внутреннего» радиусов вершин сечения. При перекосе волокна, равном  $0^\circ$ , радиусы  $R_n$  и  $R_b$  (рис. 5, а) равны между собой и соответствуют величине  $0,2 \pm 0,05$  мм. Увеличение перекоса приводит к увеличению «наружного» радиуса  $R_n$  (рис. 5, б). Величина

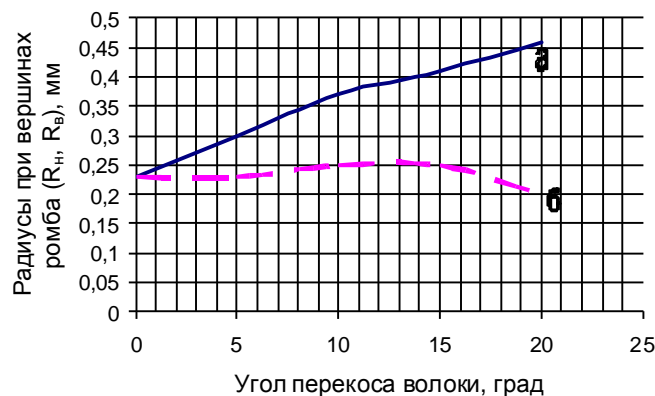


Рис. 6. График изменения радиусов скругления вершин сечения от величины перекоса волокна

же «внутреннего» радиуса  $R_b$  практически не изменяется (см. рис. 5, б) до определенной величины перекоса волокна, а при превышении перекоса на  $15^\circ$  он начинает уменьшаться. На диаграмме (рис. 6) выражено изменение «наружного» радиуса  $R_n$  (линия а) и также показано, что «внутренний» радиус  $R_b$  (линия б) практически не изменяется до величины перекоса  $14-15^\circ$ .

Таким образом, анализ результатов эксперимента показал, что путем изменения угла выхода профиля ромбовидного сечения обеспечиваются необходимые параметры поперечного сечения профиля для изготовления резьбовых вставок. Следует отметить, что необходимо разработать математическую модель данного процесса с целью определения усилия волочения, формоизменения профиля различных типоразмеров.

#### Библиографический список

1. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые соединения. М.: Машиностроение, 1973.
2. ГОСТ 9150-81.

УДК 621.73.073

М. С. Малышева, А. К. Белан

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

В настоящее время во всех отраслях промышленности наблюдается тенденция интенсификации производства при условии обеспечения требуемого уровня качества продукции. Данное направление развития производства затронуло и процесс холодной объемной штамповки. Проблема повышения производительности при необходимом уровне качества становится особенно

актуальной при изготовлении стержневых изделий с увеличенной формой головки. К таким изделиям относятся закладные болты и штепсели для железнодорожного скрепления, шаровые пальцы автомобилей, оси и др.

При холодной объемной штамповке заготовок с большой величиной отношения длины выдавливаемой части к ее диаметру все большее приме-

ние находит метод поперечного выдавливания. Однако он используется в основном при выдавливании средней части сплошной заготовки. Представляет интерес изучение возможностей применения метода поперечного выдавливания для торцовых частей заготовок и исследование характера поведения материала при таком способе формоизменения.

Для решения поставленной задачи необходимо использовать только модель, способную описать напряженно-деформированное состояние по всему объему деформируемого металла. Поскольку традиционные способы моделирования часто не удовлетворяют таким требованиям, прибегают к численному моделированию [1]. В настоящее время одним из самых популярных численных методов для решения задач механики твердого деформируемого тела является метод конечных элементов, который часто трактуется как метод Рунге [2]. Этот метод позволяет подойти к решениям технических проблем в условиях, близких к практическим, без ограничений и помех, связанных с производственными неполадками. Деформируемое тело разбивается на конечные элементы и внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещения в узлах, т.е. в местах стыков конечных элементов. Координатные функции имеют локальный характер и зависят от способа дискретизации рассматриваемой области. Это позволяет с помощью малых элементов аппроксимировать поля перемещений или скоростей перемещений для сложных форм очага деформации, выбирая простые координатные функции [2]. Метод конечных элементов характеризуется, в отличие от других методов числовой обработки процессов деформации, всеобъемлющей реализацией фундаментальных взаимосвязей по теории пластичности и дифференцированным учетом краевых условий. Он позволяет воспроизводить сложные трехмерные процессы обработки давлением и решать важные практические задачи. Преимуществом численного моделирования процесса в отличие от техники испытаний является независимость от практических ограничений, издержек на эксплуатацию и проблем техники измерений при регистрации параметров процесса.

Была разработана математическая конечно-элементная модель и на ее основе создана программа для расчета объемной деформации. Данная модель была адаптирована к условиям поперечного выдавливания металла при деформировании заготовки при поперечном выдавливании. Были приняты следующие допущения:

– решаемая задача – задача объемного деформирования;

– деформируемая среда – упругопластическая;

– исходный материал заготовки – изотропен и однороден.

Поле напряжений должно удовлетворять дифференциальным уравнениям равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Уравнение связи компонентов тензора деформации и вектора перемещений имеет вид:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right). \quad (2)$$

Стоит отметить достаточную гибкость модели в отношении таких зависимостей процесса, как закон трения на контакте инструмента с деформируемым телом и закон упрочнения металла. При описании процесса холодной объемной штамповки в модели использован модифицированный закон трения Амонтона-Кулона:

$$\overline{\tau}_k = \mu \overline{\sigma}. \quad (3)$$

Этот закон достаточно быстро просчитывается и не несет дополнительных затрат машинного времени.

Контактное касательное напряжение раскладывают на две ортогональные проекции по осям  $X$  и  $Y$ :

$$\begin{aligned} \tau_{kX} &= -\tau_k (v_X - V_X) / \Delta v^*; \\ \tau_{kY} &= -\tau_k (v_Y - V_Y) / \Delta v^*, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $v_X$  и  $v_Y$  – тангенциальные компоненты скорости металла на контакте с валком;  $V_X$  и  $V_Y$  – тангенциальные компоненты скорости вала.

Для плавного изменения касательного контактного напряжения в нейтральной точке абсолютное значение относительной скорости в уравнении (4) рассчитывается следующим образом:

$$\Delta v^* = \sqrt{\Delta v^2 + v_S^2}, \quad (5)$$

где  $\Delta v$  – относительная скорость;  $v_S$  – малая положительная константа, сравнимая с абсолютным значением относительной скорости за исключением области, близкой к нейтральной точке.

Решение задачи сводится к поиску экстремума функционала:

$$\chi = \frac{1}{2} \iiint_D \sigma^T \varepsilon dD - \iint_S \vec{\sigma} \cdot \vec{u} dS. \quad (6)$$

Величины перемещений, деформаций и напряжений на каждом шаге определяются как:

$$\vec{u}^* = \vec{u}^* + \Delta\vec{u}; \quad \varepsilon = \varepsilon^* + \Delta\varepsilon; \quad \sigma = \sigma^* + \Delta\sigma, \quad (7)$$

где  $\vec{u}^*, \varepsilon^*, \sigma^*$  – значения перемещений, деформаций и напряжений на предыдущем шаге.

В качестве вариационного принципа принят модифицированный метод Лагранжа.

Функции  $\vec{u}^*, \varepsilon^*, \sigma^*$  обеспечивают экстремум функционала, поэтому задача состоит в определении перемещений функций  $\Delta\vec{u}, \Delta\varepsilon, \Delta\sigma$ , приводящих функционал к экстремуму на следующем шаге.

Параметрами упрочнения среды являются интенсивность деформации сдвига  $\Gamma$  и интенсивность скорости деформации сдвига  $H$ :

$$\Gamma = \sqrt{2e_{ij}e_{ij}}; \quad H = \sqrt{2\eta_{ij}\eta_{ij}}, \quad (8)$$

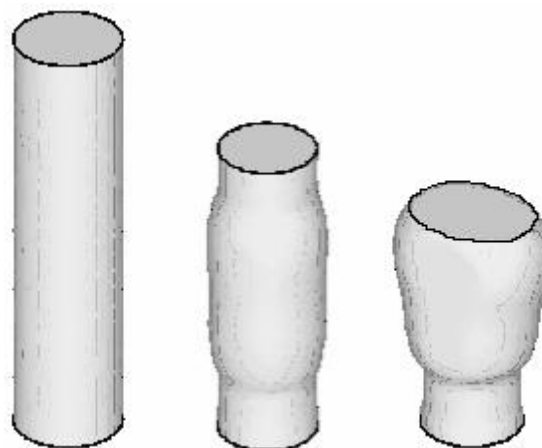
где  $e_{ij}, \eta_{ij}$  – компоненты девиаторов тензоров деформации и скорости деформации.

В качестве исходных данных для выполнения анализа были взяты действующие в условиях кузнечно-прессового цеха ОАО «ММЗ» технологические карты изготовления закладных болтов для рельсовых скреплений железнодорожного пути по ГОСТ 16017-79. Для производства таких изделий используются многопозиционные автоматы КА-74 и QPB-201.

Адаптация математической модели к условиям поперечного выдавливания металла заключалась, во-первых, в учете конкретных параметров процесса:

- фактических коэффициентов контактного трения;
- реального закона упрочнения соответствующей марки стали изделия;
- геометрических характеристик деформирующего инструмента и скорости его перемещения;
- степени деформации за один ход инструмента;
- геометрических параметров заготовки.

Для расчета достаточно было рассматривать только одну четверть прутка (болта) относительно



Последовательность процесса поперечного выдавливания

двух вертикальных плоскостей выдавливания. При анализе имелась возможность восстановления деформируемого тела до единого целого.

Во-вторых, для адаптации математической модели потребовался соответствующий подбор наиболее подходящей сетки конечных элементов для рассматриваемого случая. В качестве начального приближения сплошное тело было дискретизировано на элементы, представляющие собой тетраэдры в соответствии с рекомендациями работы [3].

При моделировании процесса поперечного выдавливания с помощью метода конечных элементов, кроме того, необходимо было учитывать краевые условия, накладываемые рабочим инструментом как в геометрическом, так и в физическом отношении (трение, границы текучести).

Разработанная математическая модель была применена для исследования характера формоизменения металла при изготовлении предварительной формы головки закладного болта методом поперечного выдавливания. Исходная, промежуточная и окончательная формы стержневого изделия представлены на рисунке.

Таким образом, с помощью разработанной численной методики можно провести исследование формоизменения металла в при поперечном выдавливании стержневых изделий с головкой увеличенного размера.

#### Библиографический список

1. Способы числового моделирования для разработки технологических процессов / Тивен П., Твиклер Р., Фоксен Й., Венгерот К. // Черные металлы. М.: Металлургия, 1992. № 4. С. 37–43.
2. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
3. Чумаченко Е.Н., Скороходов А.Н., Александрович А.И. К вопросу о применении метода конечных элементов в задачах о деформировании несжимаемых сред // Изв. вузов. ЧМ. 1985. № 9. С. 89–92.

А. К. Белан, М. Е. Моторьгин

## ВЛИЯНИЕ МЕЖКЛЕТЕВОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СКОРОСТНОЙ РЕЖИМ ПРОКАТКИ В БЛОКАХ С ГРУППОВЫМ ПРИВОДОМ

Процесс прокатки на непрерывных сортовых станах при наличии межклетевой деформации приводит к значительной разноширинности и разнотолщинности по длине готового проката вследствие прокатки концов полосы без натяжения. Поэтому для получения точных размеров проката необходимо исключить межклетевую деформацию полосы. С точки зрения энергосбережения деформация полосы между клетями экономичнее деформации в валках и может быть применена в процессе бесконечной прокатки. Однако этот метод требует решения многих дополнительных проблем.

Большая часть обжатия и уширения происходит в зоне отставания, предел текучести металла вследствие упрочнения быстро возрастает (см. рисунок). Между клетями предел текучести уменьшается из-за наличия процесса рекристаллизации. Если межклетевое натяжение  $q$  превысит предел текучести металла, то произойдет межклетевая утяжка. Если нет, то деформация будет только упругой.

Участок АВ можно разделить на зону упругой деформации АС и зону пластической утяжки СВ.

Процесс релаксации описывается следующей зависимостью [1]:

$$-\frac{d\sigma}{d\tau} = R(\sigma - \sigma_0)^2,$$

где  $\tau$  – время релаксации;  $R$  – константа разупрочнения, зависящая от природы металла и температуры, при которой протекает процесс

разупрочнения;  $\sigma_0$  – предел текучести металла при статических испытаниях.

В интегральной форме:

$$\int_{\sigma_T}^{\sigma_{нач}} \frac{d\sigma}{(\sigma - \sigma_0)^2} = R \int_0^{\tau} d\tau.$$

После интегрирования получим:

$$\frac{1}{\sigma_T - \sigma_0} = R\tau + \frac{1}{\sigma_{нач} - \sigma_0}. \quad (1)$$

Из выражения (1) можно найти предел текучести металла в любой точке между клетями:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \frac{\sigma_{нач} - \sigma_0}{R\tau(\sigma_{нач} - \sigma_0) + 1}.$$

А также время релаксации:

$$\tau = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{\sigma_T - \sigma_0} - \frac{1}{\sigma_{нач} - \sigma_0} \right).$$

Рассмотрим участок АС на рисунке. Это зона упругой деформации полосы. В точке С межклетевое натяжение  $q$  равно пределу текучести стали.

$$\tau' = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{q - \sigma_0} - \frac{1}{\sigma_{нач} - \sigma_0} \right),$$

где  $\tau'$  – время пребывания полосы в зоне упругой деформации.

Если  $\tau'$  больше  $\tau = l/v$ , времени, которое необходимо элементу полосы для прохождения межклетевого расстояния, то деформации будут только упругими. В противном случае будет происходить межклетевая утяжка в течение времени  $\Delta\tau = \tau - \tau'$

Для определения допустимого межклетевого натяжения, необходимого для прокатки полосы без межклетевой деформации, зададимся условием  $\tau' = \tau$ :

$$\tau' = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{[q] - \sigma_0} - \frac{1}{\sigma_{нач} - \sigma_0} \right).$$

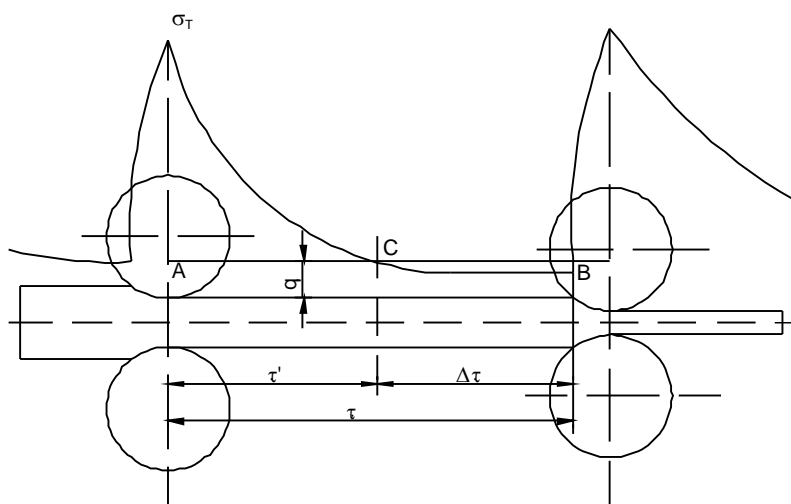


Схема изменения предела текучести металла

Далее получим выражение:

$$[q] = \sigma_0 + \frac{1}{\tau R + \frac{1}{\sigma_{нач} - \sigma_0}}$$

Ввиду незначительности величины  $\frac{1}{\sigma_{нач} - \sigma_0}$

ею можно пренебречь. Используем соотношение, устанавливающее связь между натяжением полосы и значением разности скоростей движения металла при входе в последующую клетку и выходе из предыдущей [2]:

$$\sigma = E/L \int (v_{1(i+1)} - v_{0i}) d\tau,$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $L$  – расстояние между клетками.

После интегрирования и преобразований найдем зависимость для определения рассогласования скоростей в двух смежных клетках:

$$\Delta v = \sigma v_{вых} / E.$$

Полагая  $\sigma = [q]$ , найдем необходимое рассогласование скоростей для прокатки полосы без межклетевой деформации:

$$\Delta v = 0,96 \frac{1}{E} \left( v_{вых} \sigma_0 + \frac{v_{вых}^2}{L \cdot R} \right).$$

Коэффициент 0,96 необходим для прокатки полосы без межклетевой деформации. При коэффициенте, равном 1, межклетевые натяжения  $q$  равны пределу текучести стали при данных условиях прокатки.

В чистовых клетках с групповым приводом скорость прокатки каждой клетки регулируется передаточными отношениями. Выражение для определения рабочих оборотов валков под нагрузкой с учётом наклона механической характеристики электродвигателя запишется [3]:

$$n_i = n_{0i} \left( 1 - \frac{\beta_i M_i}{n_{0i}} \right) \frac{1}{i_{pi}}, \quad (2)$$

где  $n_{0i}$  – обороты холостого хода электродвигателя;  $\beta_i$  – крутизна механической характеристики электродвигателя;  $M_i$  – крутящий момент на трансмиссионном валу.

Рассмотрим две соседние клетки. Скорость выхода полосы из клетки:

$$V_{вых i} = \frac{\pi D_i n_i}{60} (1 + S_i), \quad (3)$$

где  $D_i$  – диаметр валка;  $n_i$  – скорость вращения валков под нагрузкой;  $S_i$  – опережение.

Рассогласование скоростей происходит в результате появления сил натяжения или подпора в межклетевом промежутке:

$$\Delta V = V_{вх(i+1)} - V_{вых i}, \quad (4)$$

где  $V_{вх(i+1)}$  – скорость входа металла в последующую клетку;  $V_{вых i}$  – скорость выхода металла из предыдущей клетки.

После преобразований с учётом выражений (2)–(4) получим выражение для определения передаточного отношения в последующей клетке при прокатке без межклетевой деформации:

$$i_{p(i+1)} = \frac{\pi D_{i+1} (1 + S_{i+1})}{60 (\Delta V + V_{вых i})} (n_0 - \beta M_{i+1}).$$

Как отмечалось выше, межклетевая деформация более выгодна с точки зрения энергосбережения, чем деформация в валках. Однако её использование встречает ряд трудностей, одна из которых – управление изменением размеров и формы полосы во времени. Также для безаварийного протекания процесса необходимо соблюдение условия  $\sigma_\epsilon > q \geq \sigma_T$ , где  $\sigma_\epsilon$  – предел прочности металла при данной температуре и скорости деформирования.

#### Библиографический список

1. Данченко В.М. Непрерывная прокатка. М.: Металлургия, 2002.
2. Салганик В.М., Тулупов Д.Н. Исследование и совершенствование процесса непрерывной сортовой прокатки с натяжением // Производство проката. 2004. № 7. С. 26–31.
3. Чекмарёв А.П., Спиридонов Н.П., Куцыгин М.Д. Анализ уравнений связи между клетками непрерывного стана при трёхмерной деформации. / М.: Металлургия, 1969. С. 90–104.

Т. В. Усатая

## ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ КАК ОСНОВНОЙ КОМПОНЕНТ ПРОЕКТНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РАМКАХ ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

В настоящее время проектная деятельность является интегративным видом деятельности, синтезирующим в себе элементы познавательной, ценностно-ориентирующей, преобразовательной, профессионально-трудовой деятельности. Проектирование в целом – это мыслительная и практическая деятельность по определению общих целей и характера любой деятельности, лежащей в основе всей созидательной, преобразовательной практики и включенной в общую систему общественного производства [2]. Проектная деятельность – это творческая деятельность, направленная на преобразование окружающей предметно-пространственной среды путем создания качественно новых моделей (объектов) предметно-пространственной среды, культурных образцов и субъективно или объективно значимых ценностей.

Теоретическим и методическим основам проектной деятельности посвящены труды ряда исследователей [1, 3, 4, 6, 7], которые считают, что преобразующая деятельность человека, измеримая с глобальными и природными процессами, делает более актуальной необходимость воспитания молодого поколения, умеющего прогнозировать и предупреждать последствия этой деятельности. Они также полагают, что существуют противоречия между уровнем и темпами развития искусственной среды обитания человека и системой образования.

Особенно актуальной становится проблема отсутствия в большинстве образовательных учреждений адекватных современной ситуации образовательных технологий подготовки студентов по блоку профессий, связанных с необходимостью формирования и преобразования предметно-пространственной среды, то есть с проектной деятельностью.

Проектная деятельность способствует успешной адаптации молодежи к современным социально-экономическим условиям, формированию потребности в знаниях, высокой профессиональной мотивации и стремления к самообразованию [5].

Проектирование как основа профессиональных знаний осваивается как система постоянно усложняющихся задач при создании различных

объектов. Перед высшей школой стоит задача обеспечить общество специалистами высокой квалификации, обладающими высокой культурой, способными творчески и самостоятельно подходить к решению проблем в профессиональной проектной деятельности через развитие проектного образования.

В настоящее время имеется опыт обучения проектированию в высшей школе. Но в основном обучение ведется в педагогических университетах, художественных и художественно-промышленных вузах и училищах. Но именно в техническом университете введение проектных дисциплин наиболее оправдано и необходимо, так как инженерно-техническая подготовка студентов выступает одним из факторов, определяющих творческую направленность в процессе проектирования изделий промышленного типа. Она осуществляется благодаря единству инженерно-технических, технологических, проектно-художественных и проектно-графических дисциплин.

Инженерно-техническая подготовка развивает у студентов логическое, конструктивное мышление, умение экономично и эффективно расходовать материалы и природные ресурсы. Процесс проектирования тесно связан с профессиональной подготовкой студентов технического университета и нуждается в логическом и инженерном мышлении, которое способствует созданию реалистичных замыслов.

Несмотря на имеющиеся исследования, в настоящее время не существует единой точки зрения по вопросам содержания проектного образования, его принципов, форм, методов; исследователи в основном предлагают свои методики обучения отдельным видам проектирования.

Изучив труды отечественных и зарубежных теоретиков дизайна, можно выделить отдельные разделы теории художественного проектирования: по истории дизайна, сведения по промышленной графике, основам композиции, методам проектирования. В то время как необходима единая целостная система специальных знаний, составляющих содержание проектного образования студентов, состоящая из следующих блоков: 1) универсальная методика художественного проектирования: сущность, специфика, задачи



дизайн-деятельности; методы работы над проектированием и моделированием объектов дизайна, методы проектного поиска, история дизайна; 2) основы формообразования, закономерности и принципы композиции, способы подачи проектных решений; 3) технологический блок: изучение конструктивных и пластических свойств материала; этапов, способов проектирования и конструирования, виды конструкций, функционально-техническая структура предмета проектирования; 4) эстетический блок: выбор оптимального цветового решения, стилиобразование, шрифты, разработка фирменного стиля и др.

В настоящее время студенты технического университета имеют возможность освоить полное содержание проектной деятельности в рамках специально разработанной методики [7]. Для студентов специальности «Технология и дизайн упаковочного производства» разработана, экспериментально проверена и в настоящее время используется методика развития проектной деятельности студентов.

Исходя из сущности процесса развития проектной деятельности студентов и его особенностей, был разработан комплекс педагогических условий, способствующий эффективности развития проектной деятельности: использование в учебном процессе дидактического комплекса, включающего в себя творческие проектные задания; развитие мотивации студентов к проектной деятельности с помощью приемов актуализации; самостоятельное выявление и решение студентами проблемных проектных ситуаций на основе получаемых знаний; развитие оценочного компонента деятельности в структуре проектной деятельности студентов.

Методика развития проектной деятельности основана на реализации комплекса педагогических условий и включает в себя следующие компоненты: основополагающую идею, принципы, содержание, определенную структуру, формы организации проектной деятельности, методы и диагностику результатов. Специфика методики заключается в ее направленности на проектную деятельность и в интеграции принципов, форм (выполнение дизайн-программы, защита проекта, индивидуальные консультации), методов (проблемного изложения, исследовательского, ситуационного анализа), приемов актуализации проектной деятельности.

Методикой предусмотрены два типа задач – проблемные проектные ситуации и творческие проектные задания, стимулирующие мотивацию студентов к проектной деятельности. Решая проблемные проектные ситуации, студент вы-

полняет предпроектное исследование: анализирует проектную ситуацию, самостоятельно выявляет и формулирует проблему, определяет потребителя, выявляет требования к предмету и объекту проектирования, делит их на классификационные группы, проводит анализ аналогов, генерирует проектные идеи, вырабатывает критерии оценки своей проектной разработки (что помогает ему анализировать и контролировать процесс собственной художественно-проектной деятельности), обосновывает выбор оптимального варианта проектного решения. При этом студент опирается на теоретические знания из лекционного курса, а недостающие сведения по проблеме проекта добывает самостоятельно. Выполнение творческого проектного задания предполагает, помимо всего, формулирование проектной концепции – основной структурированной идеи проектной разработки. Данные задания различаются по сложности и структуре и предполагают разные способы проектирования. Методика предусматривает задание для самоконтроля и ряд приемов актуализации художественной ценности проектируемых предметов.

Реализация первого педагогического условия – использование в учебном процессе дидактического комплекса с применением творческих проектных заданий – предполагает выполнение творческих проектных заданий, т. е. творческую деятельность по выявлению и поиску нестандартного решения сформулированной проблемы.

Согласно второму педагогическому условию – развитие мотивации студентов к проектной деятельности с помощью приемов актуализации – стимулировать мотивацию студентов к проектной деятельности помогает прием актуализации практических действий проектной деятельности, ее результатов и их применения. В результате применения данного приема студенты осознают важность и необходимость усвоения теоретических знаний, способов деятельности, умеют увязывать свои интересы, потребности, мотивы учебной деятельности с предстоящей профессиональной проектной деятельностью.

В рамках методики предлагается ряд последовательных приемов актуализации проектной деятельности, способствующих развитию мотивации студентов: 1) сообщение студентам информации, побуждающей к осознанному поиску недостающей информации для разработки проектной концепции (сообщается информация о способах, области деятельности; студенту необходимо собрать информацию для выполнения анализа проектной ситуации, структурировать полученную информацию, сделать выводы, выявить проблему, сформулировать

требования, обобщить всю информацию и на ее основании выработать проектную концепцию); 2) формирование и развитие у студентов умений: ставить цель, разбивать ее на подцели, задачи; генерировать множество проектных решений и обосновывать выбор оптимального варианта, вырабатывать критерии оценки своей проектной разработки (для этого студентам сообщаются способы и методы проектной деятельности, средства, структура проектной деятельности, студенты должны самостоятельно перенести универсальные знания на свою разработку и воплотить их в создании авторской проектной концепции); 3) создание положительной мотивационной перспективы на последующую проектную деятельность (со студентами обговариваются перспективы будущей проектной деятельности с различных точек зрения: необходимости полезности, социальной и личностной значимости, создания эстетически-привлекательного окружающего предметного пространства и др.).

Согласно третьему условию – самостоятельное выявление и решение студентами проблемных проектных ситуаций на основе получаемых знаний – студентам предлагаются задания, направленные на формирование и развитие умений самостоятельной исследовательской проектной работы; на творческую деятельность по поиску нестандартных решений, что создает условия для самореализации, саморазвития личности студента. Данные задания представляют собой проекты, тема которых определяется преподавателем.

Процесс проектирования изделий представляет собой творческий поиск, в результате которого появляются новые субъективно и объективно значимые ценности, то есть решение проблемных проектных ситуаций и творческих проблемных заданий предполагает также выполнение четвертого педагогического условия – развитие оценочного компонента деятельности в структуре проектной деятельности студентов.

Задания, предусматривающие реализацию четвертого педагогического условия, представляют собой выполнение проектов и предполагают формулирование проектной концепции. Про-

ектная концепция – основная образная идея будущего предмета, формулировка его смыслового содержания как идейно-тематической основы проектного замысла дизайнера по отношению к конкретным целям и задачам проекта. Концепция дает возможность создать целостную идеальную модель будущего предмета и описать его качественные и количественные характеристики. Разработка проектной концепции позволяет студенту осуществить процесс актуализации художественной ценности проектируемых предметов, так как, разрабатывая проектную концепцию, студент переводит всю информацию о предмете проектирования из потенциального состояния в актуальное действие. Информация структурируется, анализируется, обобщается и вырабатывается основная образная проектная идея; закладывается смысловое и ценностное содержание будущего предмета, его функциональные, технологические, эстетические характеристики, которые и составляют ценность.

Данная методика направлена, прежде всего, на интеллектуальную проектную деятельность студентов и интегрирует в себе различные формы и виды учебной деятельности. В настоящее время методика адаптирована и для студентов других специальностей. Так, студенты специальности «Дизайн архитектурной среды» осваивают основы проектной деятельности в процессе изучения дисциплины «Основы художественного проектирования архитектурной среды». Для студентов специальности «Проектирование технических и технологических комплексов» разработан курс промышленного дизайна в рамках дисциплины «Художественное проектирование промышленных изделий». В основе обучения студентов данных специальностей – методика развития проектной деятельности будущих инженеров.

Таким образом, развитие проектного образования в техническом университете осуществляется в процессе освоения проектной деятельности студентами различных специальностей на основе оригинальной методики развития проектной деятельности будущих инженеров.

#### Библиографический список

1. Аронов В.Р. Дизайн и искусство. М.: Знание, 1984. 158 с.
2. Джонс К.Дж. Методы проектирования: Пер. с англ. / Под ред. В.Ф. Венды. М.: Мир, 1986. 376 с.
3. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход. М.: Мир, 1981. 454 с.
4. Каган М.С. Системный подход и гуманитарное знание. Л.: ЛГУ, 1991. 381 с.
5. Профессиональная педагогика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Ассоциация «Профессиональное образование», 1999. 904 с.
6. Симоненко В.Д. Технологическая культура и образование (культурно-технологическая концепция развития общества и образования). Брянск: изд-во БГПУ, 2001. 214 с.
7. Усатая Т.В. Методика развития проектной деятельности будущих инженеров: Методические рекомендации для преподавателей. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. 30 с.

В. И. Кадошников, К. Н. Вдовин, Е. В. Куликова, И. Д. Кадошникова, С. В. Куликов

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ СЕРДЕЧНИКА МЕХАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Одним из условий получения биметаллической сталемедной проволоки способом «наморачивания» является наличие на поверхности сердечника промежуточных слоёв третьего металла, которым является олово. Чем тоньше слой олова на поверхности сердечника, тем сильнее связь между стальным сердечником и медной оболочкой. Нанесение промежуточных слоёв, в потоке с последующим наморачиванием, возможно с использованием щёточной технологии [1], широко используемой во многих технологических процессах для получения необходимых потребительских свойств продукции [2]. Щёточная технология позволяет наносить тонкие слои покрытия на металлические поверхности различной формы и назначения, включая и длинномерные изделия. Наиболее важным и оказывающим большое влияние на механические свойства готовой продукции является сплошность промежуточного слоя. Такого эффекта можно добиться, используя большое количество щёток, равномерно распределённых вокруг обрабатываемого сердечника. Коэффициент полезного действия машины со множеством щёток, имеющих индивидуальный привод, очень мал. При этом необходимо применять устройства, удерживающие обрабатываемый сердечник в зоне воздействия, создающие жёсткость и его прямолинейность [3]. Кроме этого обрабатываемый сердечник должен прижиматься с определённым усилием к торцевой поверхности щётки, и этот прижим должен быть постоянным в процессе всего времени обработки. С этой целью каждая щётка должна быть обеспечена исполнительным механизмом, срабатывающим при уменьшении натяга в результате износа щётки [4].

В основу создания устройства, позволяющего обрабатывать поверхность сердечника равномерно по всему периметру, заложено оригинальное решение, позволяющее это сделать, используя всего одну щётку. Общий вид, в рабочем положении и в состоянии заправки, схема устройства для обработки сердечника по всему периметру приведён на **рис. 1**.

Для нанесения покрытия на поверхность сердечник 1 необходимо заправить в устройство, для этого оно вводится в состояние заправки сердечника. Плита, на которой смонтирована

щётка 3 с приводом от электродвигателя через ремённую передачу, устанавливается в вертикальное положение, и щётка выводится из контакта с поверхностью барабанов 2. Сердечник 1 наматывается одним сплошным слоем на первый барабан по часовой стрелке, а затем сердечник наматывается на второй барабан также одним сплошным слоем, но против часовой стрелки.

Такой способ навивки даёт возможность щётке производить воздействие на обе половины периметра сердечника. Затем плита опускается, ворс щётки 3 вводится в контакт с барабанами с намотанным на них сердечником, включается привод вращения щётки, привод перемещения сердечника и привод вращения ЭМП 4. При этом ЭМП находится в контакте с ворсом щётки. Сердечник, перемещаясь, приводит во вращение барабаны, при этом на барабаны постоянно поступает и сходит сердечник, причём поступающий сердечник оттесняет намотанные витки на расстояние, равное диаметру обрабатываемого сердечника. При оттеснении происходит небольшое подкручивание сердечника. Для того чтобы происходило оттеснение, барабаны выполнены конусными и со стороны поступления сердечника снабжены галтелью, ширина которой равна пятнадцати диаметрам обрабатываемого сердечника и уклоном 1:20 (см. **рис. 1**).

Такой способ навивки позволяет сердечнику вступать в контакт со щёткой обеими сторонами и при переносе металла покрытия ворсом щётки формировать покрытие по всему периметру сердечника. Наличие большого количества витков сердечника позволяет одной щёткой многократно воздействовать на одну и ту же поверхность, что положительно влияет на формирование покрытия сердечника. Первые витки будут очищаться, подготавливаться под покрытие, а на последующие витки будет наноситься само покрытие, снимаемое с ЭМП, контактирующего со щёткой 3.

Существует большое количество устройств для удержания и подачи ЭМП, однако наиболее приемлемым является устройство, описанное в работе [5]. Устройство состоит из двух полых цилиндров, один из которых закреплён на корпусе ограждения щётки, а второй установлен в первом с возможностью осевого перемещения вместе с ЭМП, размещённом в нём. На торце

второго цилиндра закреплён двигатель с валом упруго, через пружину, соединённым с ЭМП и приводящим его во вращение. Элемент материала покрытия выполнен в виде стакана, в доньшке которого имеется отверстие с резьбой для со-

единения его с валом двигателя. Такая форма ЭМП, как показывает опыт, обеспечивает наилучшие условия для съёма частиц металла ворсом щётки с последующим его переносом на обрабатываемый сердечник.

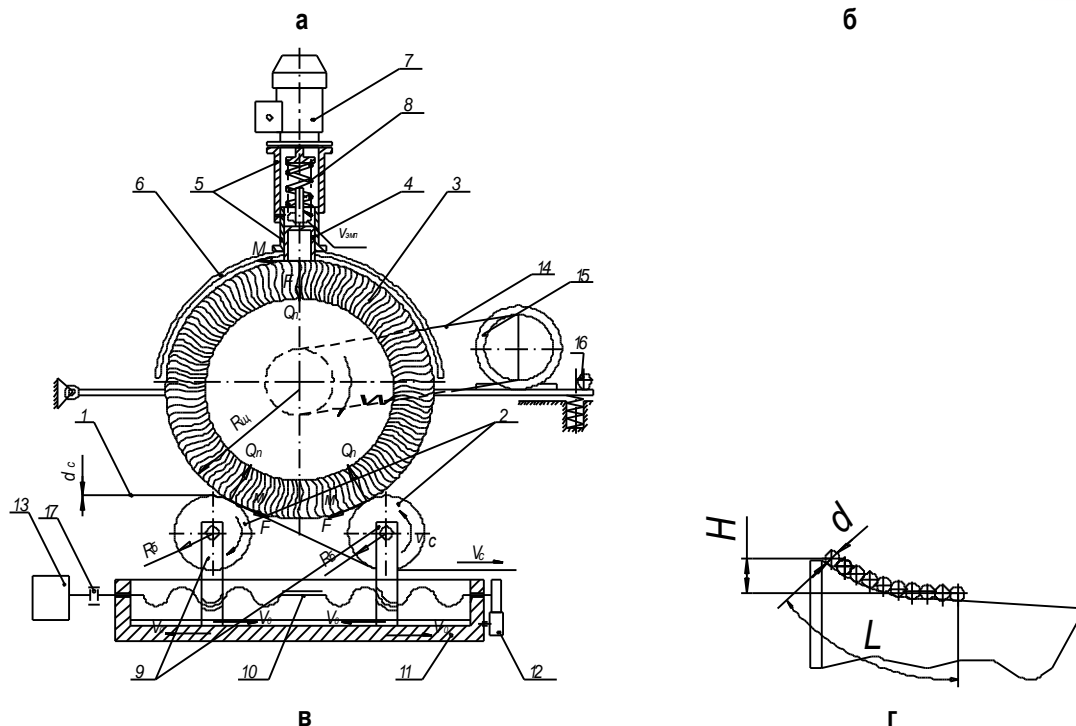
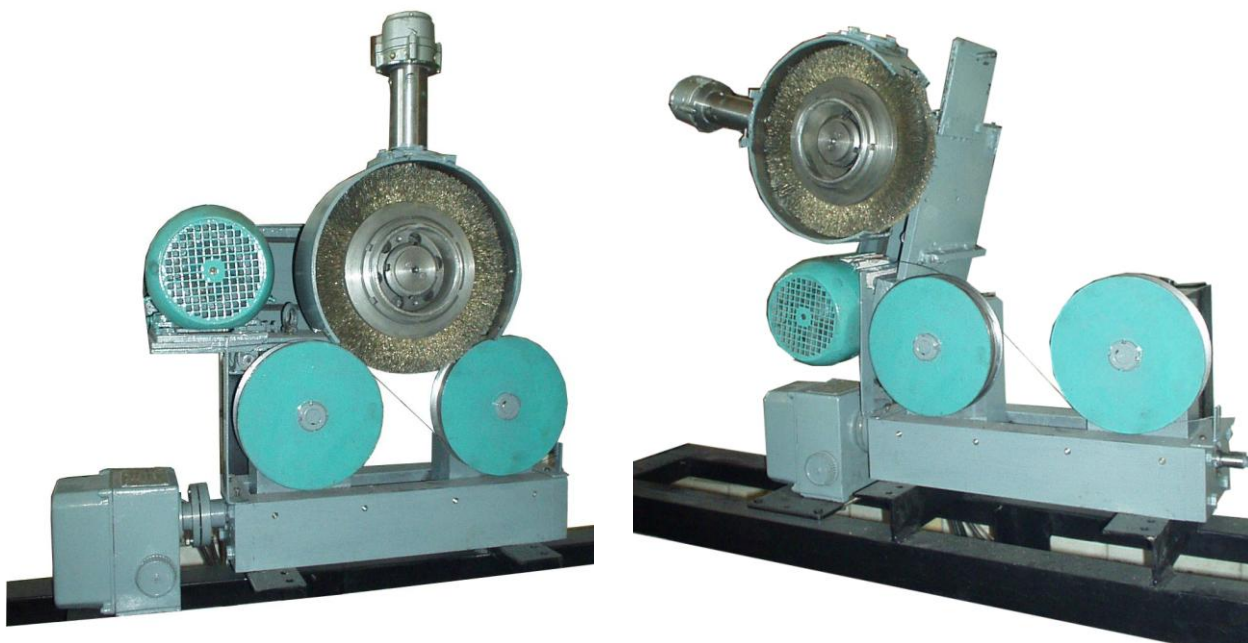


Рис. 1. Устройство для обработки сердечника:

- а – вид установки в рабочем положении; б – вид установки в положении заправки сердечника;  
 в – схема устройства; г – фрагмент галтели барабана; 1 – сердечник; 2 – барабаны; 3 – щетка; 4 – ЭМП;  
 5 – цилиндры подачи ЭМП; 6 – защитный кожух; 7 – электродвигатель ЭМП; 8 – пружина; 9 – опоры барабанов; 10 – винт ходовой; 11 – основание; 12 – храповой механизм; 13 – электродвигатель перемещения барабанов; 14 – ременная передача; 15 – шкив; 16 – эксцентрик; 17 – муфта

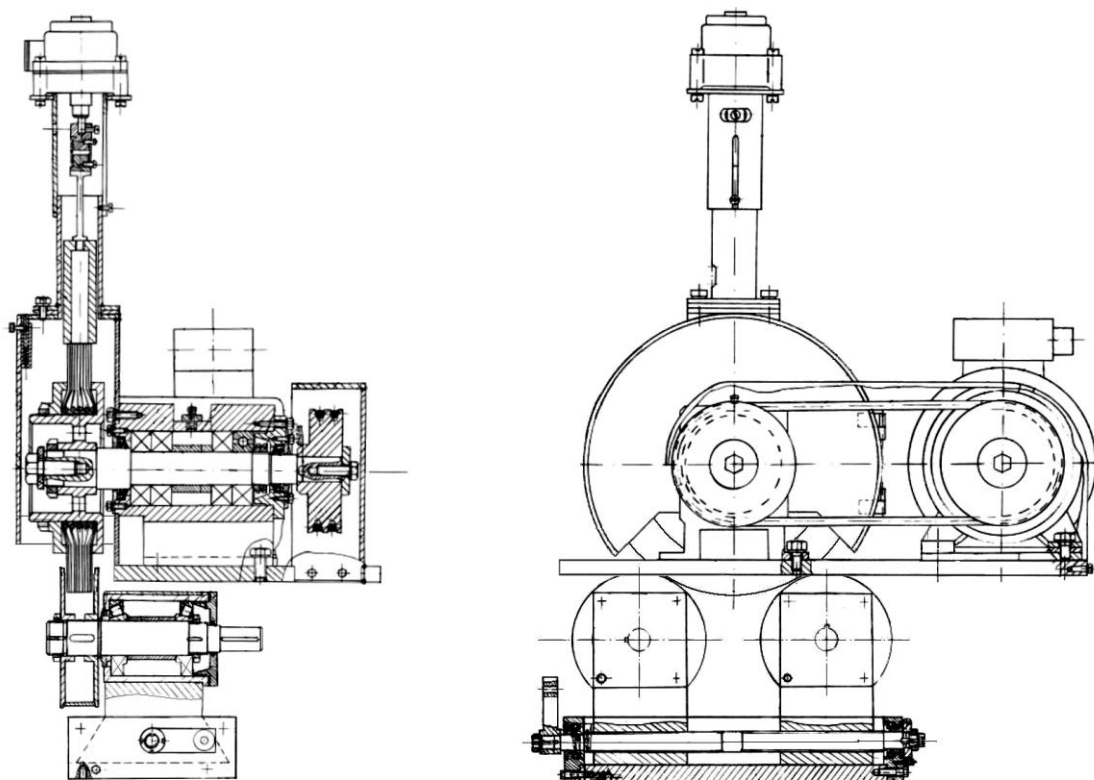


Рис. 2. Конструкторская проработка устройства для подготовки сердечника

Кроме формы и режимов нагружения ЭМП на качество покрытия оказывает влияние постоянство натяга, который создаётся за счёт сведения барабанов (см. рис. 1). Под натягом подразумевается разница между межосевым расстоянием от момента контакта до рабочего положения щётки и контактирующим с ней барабаном, на поверхности которого размещён сердечник.

Для возможности сведения опора каждого барабана, установленного консольно, выполнена с ласточкиным хвостом в основании и отверстием с резьбой, причём в одной опоре выполнена резьба правая, а в другой – левая (рис. 2).

Опоры соединены между собой с помощью винта, имеющего с одной стороны правую, а с другой левую нарезку. Ласточкины хвосты опор барабанов установлены в паз основания, имеющего такой же профиль, с возможностью их перемещения. При вращении винта опоры могут сходиться или расходиться, а барабаны, находящиеся на этих опорах, прижиматься или отходить от торца щётки.

Механизм сведения барабанов выполнен таким образом, что к валу винта можно крепить исполнительный механизм, который обеспечивает автоматическое слежение за процессом нанесения покрытия на сердечник [6].

Данное устройство было опробовано на предприятии «СММ-Профит» в технологической линии нанесения медного покрытия, основанной на методе оборачивания стального прутка медной лентой. С помощью разработанного устройства (подана заявка на патент на полезную модель) была произведена подготовка поверхности сердечника перед её оборачиванием лентой. В качестве материала покрытия использовалась медь марки М1, что позволило уменьшить степень обжатия заготовки, состоящей из стального сердечника с тонким поверхностным слоем меди и обёрнутой вокруг него медной ленты, с увеличением сцепления компонентов после волочения на готовый размер. Уменьшение степени обжатия привело к уменьшению энергопотребления при изготовлении проволоки с медным покрытием.

#### Библиографический список

1. А.с. 1206068 СССР, МКИ<sup>3</sup> В24В 38/00. Способ нанесения покрытий / Л.С. Белевский, В.И. Кадошников, И.Д. Кадошникова и др.
2. Сталеалюминиевая проволока с улучшенным качеством сцепления / Л.С. Белевский, Г.В. Бухиник, Б.А. Никифоров, В.И. Кадошников // Сталь. 1986. № 5. С. 69–71.

- Кадошников В.И. Совершенствование технологии производства биметаллической сталеалюминиевой проволоки, применением нового способа нанесения промежуточного слоя: Дис... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1988. 192 с.
- Определение контактных температур при плакирующей обработке деталей гибким инструментом / В.И. Кадошников, Р.Р. Дёма, Е.В. Куликова и др. // *Материаловедение и современные технологии: Межрег. сб. науч. тр.* Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 140–143.
- Пат. 1590354 РФ, МКИ В24В 39/00. Устройство для нанесения покрытий / В.П. Анцупов, Л.С. Белевский, В.А. Досманов, В.И. Кадошников.
- Баженов А.А., Кадошников В.И., Куликова Е.В. Автоматизация процесса плакирования гибким инструментом // *Автоматизация технологических объектов и процессов: Материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф. Донецк: ДНТУ, 2002. С. 6–8.*

УДК 378.147.88:744

Е. А. Свистунова

## **К ВОПРОСУ ОБ ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ В ОБУЧЕНИИ ГРАФИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ**

В требованиях государственных образовательных стандартов к учебным программам второго и третьего уровней высшего профессионального образования графические дисциплины отнесены к циклу общепрофессиональных дисциплин и имеют различные названия: «Начертательная геометрия и инженерная графика», «Инженерная графика», «Инженерная графика и основы проектирования», «Компьютерная графика», «Основы конструирования». С учетом современных тенденций развития образования этот курс предусматривает повышение уровня графической грамотности по различным направлениям профессиональной подготовки.

Профессионал – это личность, обладающая нестандартным мышлением, способностью разбираться в проблемах, находить основания для правильных решений, непрерывно продолжая учиться самостоятельно.

Курс должен быть составлен на основе принципа гуманизации. Этот принцип является основным на современном этапе развития образования в целом и преподавания графических дисциплин в частности. Принцип гуманизации предполагает организацию курса с учетом потребностей обучающегося в области повышения уровня его образованности и готовности к различным видам деятельности. Предугадать, что потребуется человеку в его работе даже через два-три года практически невозможно в силу динамизма технологий.

Исторически сложилось так, что в отечественном образовании повышенное внимание уделяется усвоению студентами знаний. Однако объем знаний человечества увеличивается последние 10–20 лет в геометрической прогрессии, считается, что он удваивается каждые 5–7 лет.

В такой ситуации не приемлемы жесткие, однозначно заданные модели состояния образован-

ности личности в виде фиксированных умений, суммы знаний и другого. Образовательная программа курса, основанного на принципе гуманизации, учитывает индивидуальные запросы обучающегося, позволяет осуществить естественный поиск каждым из них своей собственной траектории подготовки и повышения образовательного уровня. Подобный подход должен быть присущ не только всему образовательному учреждению, но и изучению отдельной учебной дисциплины.

Целью графического образования является изучение графического языка как элемента единой культуры и формирование системной графической деятельности студентов как обязательного компонента функциональной грамотности специалиста – инженера.

Совершенствование графической подготовки студентов во многом определяется уровнем овладения ими методологическими знаниями структуры языка и методологическими умениями по самостоятельному проектированию своей графической деятельности, ее эффективной организации и качественному содержательному контролю. Важную роль в этом и играет правильная организация деятельности студентов в условиях развивающего и воспитывающего обучения, формирование обобщенных приемов решения графических задач и рациональных приемов графической деятельности, грамотное использование технической информации, изучение существующих стандартов.

Статья 14 закона «Об образовании» обязывает ориентировать образование на: «...обеспечение самоопределения личности, создание условий для ее самореализации». Таким образом, необходимо внедрение в учебный процесс осознанной рациональной самоорганизации студентов как один из элементов педагогической модели обучения графическому языку.

Итак, при выполнении любого вида самостоятельной работы студент должен пройти следующие этапы:

- определение цели самостоятельной работы;
- конкретизация познавательной (проблемной или практической) задачи;
- самооценка готовности к самостоятельной работе по решению поставленной или выбранной задачи;
- выбор адекватного способа действий, ведущего к решению задачи (выбор путей и средств для ее решения);
- планирование (самостоятельно или с помощью преподавателя) самостоятельной работы по решению задачи;
- реализация программы выполнения самостоятельной работы;
- осуществление в процессе выполнения самостоятельной работы управленческих актов: контроль над процессом самостоятельной работы, самоконтроль промежуточных и конечного результатов работы, корректировка на основе результатов самоконтроля и устранения ошибок.

По мере формирования у студентов навыков и умений по построению изображений различного содержания и назначения учебные задания постепенно могут усложняться, непосредственная помощь педагога уменьшится, а самостоятельность самих студентов соответственно увеличится. Студенты приобретают навыки в самостоятельной работе путем личного опыта и под руководством преподавателя.

Организация учебного процесса обеспечивается комплексным методическим обеспечением предметов, которая состоит как из традиционных, так и современных средств. Одним из них является учебно-методический комплекс, основанный на анализе образовательных стандартов, отвечающих целям, закономерностям, требованиям к содержанию подготовки квалифицированного специалиста (инженера). Учебно-методический комплекс включает в себя учебную программу по дисциплине, учебное пособие, курс лекций или учебник, тесты и задания по отдельным темам лекций для самоконтроля студентов, методические указания по проведению практических, лабораторных занятий, а также методические рекомендации для студентов по изучению определенной дисциплины.

Применение навыков самостоятельной работы на практике позволяет повысить эффективность обучения, так как позволяет студенту в удобное для него (нее) время осваивать учебный материал, помогает научиться пользоваться разнообразной учебной литературой.

При разработке практических занятий в обучении графическим дисциплинам удобно использовать уровневые самостоятельные работы, которые разрабатываются в соответствии с уровнем активности студентов.

Видится целесообразным взять за основу следующую градацию самостоятельных работ студентов в зависимости от степени их активности:

1. Репродуктивная самостоятельная работа студента по заданию преподавателя, образцы выполнения, которой ему уже известны. Целью таких заданий является закрепление знаний, формирование и совершенствование умений и навыков. Здесь можно рассматривать усвоение студентами опорных алгоритмов для осуществления графической деятельности. Алгоритмы успешно содействуют усвоению методов изображения, а также формируют систему приемов их выполнения.
2. Реконструктивно-вариативная самостоятельная работа, осуществляемая без непосредственного участия преподавателя и требующая избирательного отношения студента к известным ему средствам и методам решения поставленной задачи. Решение студентами типовых задач. Проверка выполненных графических работ по разработанным картам самоконтроля.
3. Творческая самостоятельная работа, включающая элементы самостоятельного исследования. При этом преподавателем создается необходимая дидактическая ситуация, объективно направленная на отыскание студентами новых (ранее им неизвестных) средств и методов решения поставленной перед ними задачи и формулирование новых обобщений.
4. Еще более высокий уровень самостоятельности проявляют студенты при выполнении частично поисковых самостоятельных работ, требующих переноса нескольких известных способов решения в необычные внутрипредметные проблемные ситуации и их комбинирования.

В начертательной геометрии решению задач отводится особое внимание. При решении той или иной графической задачи, необходимо понять ее условие и четко представить себе схему решения, т.е. установить алгоритм выполнения построений.

Мы предлагаем разработку вариантов заданий для самоконтроля студентов по рейтинговой системе. При разработке заданий для самоконтроля необходимо использовать уровневые самостоятельные работы в соответствии с уровнем активности познавательной деятельности студентов. Студент может самостоятельно оценить

свои знания, пользуясь предлагаемыми нами картами самоконтроля, которые составлены из задач по изучаемым темам.

Карты и вопросы для самопроверки разбиваются на модули в зависимости от степени сложности, каждому модулю присваивается определенное количество баллов. Задачам высшей сложности присваивается максимальное количество баллов – 80–100; средней сложности – 40–79 баллов; простым задачам – 0–39 баллов. В каждом уровне задач существует несколько своих градаций по баллам: например, в высшем уровне предлагаются задачи на 80, 90 и 100 баллов. В соответствии с этим студент, самостоятельно справившийся с тем или иным заданием, объективно может проверить свой рейтинг по баллам по предлагаемым нами картам самоконтроля.

Например: при изучении «Начертательной геометрии» темы «Пересечение поверхностей» можно выделить задачи различных уровней сложности. Линии пересечения поверхностей у каждой детали свои, индивидуальные. Характер линий зависит от типа поверхностей, их размеров, особенностей взаимного расположения. Перед студентом ставится вопрос о выборе наиболее результативного и простого метода решения для данного конкретного случая пересечения и реализации этого метода. Примером уровневых модулей могут послужить задачи по этой теме:

1. Пересечение многогранных поверхностей. Пересекаться у различных поверхностей могут только грани и только по прямым линиям (простые задачи: 0 – 20 баллов).
2. Пересечение поверхностей многогранных и вращения. Это довольно часто встречающиеся на практике сочетания форм у деталей, полых изделий и сооружений. Прогнозировать результат построений линии пересечения несложно, но сами построения объемны и требуют тщательности (20 – 50 баллов).

3. Пересечение поверхностей вращения. Криволинейные поверхности в общем виде пересекаются по разомкнутым или замкнутым кривым линиям, плоским или пространственным (задачи средней сложности: 50–80 баллов).

4. Технические приложения. Каждая из геометрических ситуаций или условий задач является фрагментом изображений реальных деталей, конструкций или сооружений (задачи высшей сложности: 80 – 100 баллов).

Рейтинговая система вырабатывает привычку подбирать и читать дополнительную литературу; готовиться к занятиям столько, сколько необходимо, чтобы хорошо понять изучаемую тему и объективно самостоятельно оценивать уровень полученных знаний.

Традиционно считается, что основная разновидность самостоятельной работы – это домашняя работа. Такой вариант самостоятельной работы имеет ряд бесспорных преимуществ, пожалуй, главным из которых является разумная экономия аудиторного времени, что позволяет посвятить большую его часть отработке уже подготовленного самостоятельно материала. Она активизирует обучающихся своим организационным устройством и содержанием заданий, позволяет работать в индивидуальном темпе и стиле.

Тем самым формируется сознательное отношение к приобретению и “обновлению”, углублению своих знаний, а это, в свою очередь, является одним из важнейших требований к подготовке современного специалиста. Предоставление обучающимся возможности самостоятельно планировать собственную деятельность, выявлять ошибки, допускаемые в ходе собственных познавательных действий, вносить необходимую коррекцию в процесс осуществления своей деятельности – все это является сильной стороной обучения.

#### Библиографический список

1. Буров В.Г., Иванцовская Н.Г. Инженерная графика. М., 2004.
2. Веремей О.М. Формирование ценностных ориентаций студентов в процессе обучения основам архитектуры. Магнитогорск, 2004.
3. Закон РФ «Об образовании». М., 1996.
4. Колбасин Г.Ф. Репетитор по начертательной геометрии: Учеб. пособие. Магнитогорск, 2005.
5. Рогозинский В.М. Азбука педагогического труда. М., 1999.
6. Свиридова Т.А. Инженерная графика. М., 2003.
7. Шаламов В.З. Организация самостоятельной работы в образовательных учреждениях. М.: «Проект Ахей», 2005.



УДК 378.147:004.92

Л. В. Савочкина

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Стремительное развитие информационных технологий, появление новых технических средств, программного обеспечения требуют соответствующей подготовки от выпускников вузов, умеющих использовать в своей профессиональной деятельности возможности информационных технологий и программного обеспечения.

С внедрением компьютерных технологий в учебный процесс усложняется и сама трудовая деятельность педагога, проводящего практические занятия с компьютерной поддержкой. Информатизация технологического образования студентов требует соответствующего уровня профессиональной подготовки преподавателя и выпускника технического вуза, но, как часто бывает, на практике молодой специалист, обладая общей информационной подготовкой, оказывается не готовым к решению конкретных профессиональных задач. Из этого следует, что необходима такая система обучения студентов, которая будет способствовать обеспечению высокого качества специализированной информационной подготовки в сочетании с методической.

Речь идет об обучении, организованном с учетом ориентации на развитие важных качеств будущего специалиста и формирования профессиональных умений.

Графическая подготовка студентов необходима как для практических, так и теоретических идей. Между мысленным образом и реальным предметом существует этап, в котором присутствуют изображения – модели, макеты.

Графическая подготовка студентов включает приобретение знаний, навыков и умений при выполнении графических работ. Для реализации этих задач можно использовать на занятиях систему модульного обучения.

Используя модульную структуру при организации дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика», мы можем иначе представить проведение практических и лекционных занятий.

Гибкость модульного обучения напрямую связана с индивидуально-дифференцированным подходом в обучении, с учетом уровня знаний, потребностей, индивидуального темпа учебной деятельности студента.

Дисциплину можно разделить на пять модулей, каждый из которых рассматривается как отдельно значимая часть.

### Структура дисциплины

1. Графическое представление информации.
2. Теория, средства и алгоритмы представления информации о геометрических объектах.
3. Основы проектирования изделий и инженерного документирования.
4. Теория о средствах и алгоритмах визуализации информации результатов научных и инженерных исследований.
5. Прикладная компьютерная графика.

Содержание первого учебного модуля «Графическое представление информации» имеет небольшой объем и служит связующим звеном между остальными учебными модулями. Студенты на данном этапе должны иметь представление об основах графического представления информации.

Во втором учебном модуле «Теория, средства и алгоритмы представления информации о геометрических объектах» представлен материал по изучению основ проекционного черчения, ранее изучаемый по дисциплине начертательной геометрии.

Содержанием третьего учебного модуля «Основы проектирования изделий и инженерного документирования», являются конструирование соединений деталей и разработка конструкторской документации на разных стадиях проектирования изделий.

Четвертый учебный модуль содержит информацию о теории, средствах и алгоритмах визуализации информации результатов научных и инженерных исследований. Составление таблиц, диаграмм имеет свои особенности. Особенно у инженеров-исследователей технического профиля.

Пятый учебный модуль «Прикладная компьютерная графика» содержит теорию об использовании графических редакторов и систем для выполнения заданий по различным направлениям компьютерной графики. Например, компьютерный дизайн, виртуальное моделирование, деловая графика и т.д. Студенты, имеющие знания по этим разделам, могут предложить их к аттестации для повышения рейтинга.

Технология модульного обучения является одним из направлений индивидуализированного обучения, позволяющим осуществлять самообучение, регулирование не только темпа работы, но

## Цели освоения дисциплины «Инженерная графика»

Уровень усвоения	Цели
Иметь представление	– о принципах представления информации о процессах, объектах и явлениях, изучаемых в области профессиональных знаний; – о методах проекционного черчения
Знать	– методы построения изображений пространственных объектов на чертежах, способы проецирования; – методы компьютерной графики; – типы разъемных и неразъемных соединений; – правило построения таблиц и диаграмм; – назначение и возможности технических и программных средств компьютерной графики
Уметь использовать	– чертеж, эскиз, технический рисунок для графического представления технических решений; – стандарты в производственной и проектной деятельности; – средства и алгоритмы графического представления результатов научных и инженерных исследований
Владеть	– проекционным аппаратом для построения изображений геометрических объектов; – графическими и текстовыми редакторами, используемыми в профессиональной отрасли производства
Иметь опыт	– оформления чертежной и текстовой конструкторской документации; – составления схем, таблиц и построения диаграмм

и содержание учебного материала. Сущность состоит в том, что обучающийся более или менее самостоятельно может работать с предложенной ему индивидуальной рабочей программой.

При составлении практических заданий, выполняемых на компьютере, необходимо учитывать и цели освоения дисциплины «Инженерная графика». Их мы представим в виде **таблицы**.

Построение практических занятий со студентами осуществляется соответственно поставленным целям. Так, на практических занятиях целесообразно включать студентов в разнообразные по содержанию и форме работы. Это позволяет им не только овладеть навыками работы с различными компьютерными и графическими системами, но и применить данные навыки в дальнейшем при самостоятельном изучении каких-либо программ, разделов компьютерной графики, а также других дисциплин учебного плана, где используется графическое представление информации (схемы, чертежи, диаграммы, рисунки).

В зависимости от этого можно выделить три уровня деятельности студента:

- 1) репродуктивный;
- 2) реконструктивный;
- 3) творческий.

На их основе студенты выполняют работы, которые можно охарактеризовать следующим образом:

- 1) репродуктивная работа – студент по заданию преподавателя выполняет работу, образцы которой ему уже известны. Целью таких заданий

является закрепление знаний, формирование и совершенствование умений и навыков;

- 2) реконструктивная работа – осуществляется без непосредственного участия преподавателя;
- 3) творческая работа – включает элементы самостоятельного исследования.

Эти работы можно проиллюстрировать на практических занятиях с использованием компьютерных технологий.

Сначала студенты выполняют репродуктивную работу по образцу, подробно описанному в учебно-методическом пособии. На примере применения простейших операций в графической системе КОМПАС (команды управления экраном, создание графических примитивов, оформление и редактирование чертежей и т.д.).

Следующим этапом является выполнение реконструктивной работы, где студенты создают наглядное изображение детали сложной технической формы по указанным размерам по заданному наглядному изображению. Студенты применяют опробованные ими ранее операции.

Завершающим этапом является творческая работа, где студент по наглядным деталям должен сам найти рациональный метод проведения графических операций, наглядно оформить чертеж, свободно владеть навыками использования команд.

Компьютеризация обучения дает возможность создавать методические основы альтернативных форм учебного процесса, реализовывать дифференциацию обучения. Компьютерная техника активно влияет на процесс соединения образования с самообразованием.

## Библиографический список

1. Ибрагимов И.М. Информационные технологии и средства дистанционного обучения: Учеб. пособие для студ. вузов / Под ред. А.Н. Ковенова. М.: Издат. центр «Академия», 2005.

2. Коджаспирова Г.М., Петров К.В. Технические средства обучения и методика их использования: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений. М.: Издат. центр «Академия», 2003.
3. Инженерная графика: общий курс: Учебник / Под ред. Н.Г. Иванцевской и В.Г. Бурова. М.: Логос, 2004.

УДК 621.735.32.011.001

В. Г. Паршин, А. К. Белан, О. А. Белан, М. С. Малышева

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Для получения изделий с увеличенной головкой на операции предварительной высадки применяют штампы с подпружиненным пуансоном [1]. В таких пуансонах формирование головки происходит в закрытом объеме поперечным выдавливанием. Форма предварительно высаженной головки может быть различной и зависит от формы и размеров готового изделия. Штамповка головок из большого объема металла связана с высокими усилиями штамповки, что необходимо учитывать при разработке технологических процессов.

При холодной штамповке головок стержневых изделий из цилиндрической заготовки в штампе с подпружиненным пуансоном промежуточную заготовку можно условно разделить на два участка в зависимости от направления течения металла (рис. 1).

В соответствии с этим необходимо рассмотреть условия течения металла на обоих участках, в совокупности определяющие усилия выдавливания.

Осевое давление на первом участке с достаточной точностью определяется трением металла о стенки пуансона [2]:

$$P_1 = P_{mp} = \mu_1 \sigma_s \pi d_0 \ell_1, \quad (1)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент трения на первом участке;  $\sigma_s$  – напряжение текучести на первом участке, которое здесь и в дальнейшем определяли как функцию интенсивности деформации  $e_i$ ,

$$\sigma_s = (\sigma_i)_{пред} - C e^{-e_i} - C_1 e^{-Ne_i},$$

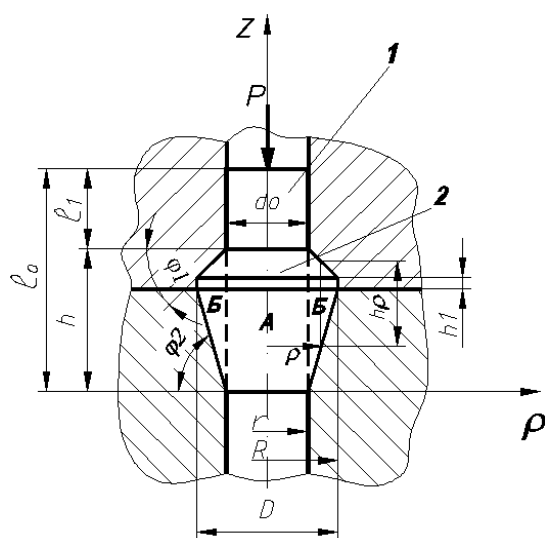


Рис. 1. Схема процесса высадки в штампе с подпружиненным пуансоном:

- 1 – цилиндрический участок, в котором металл не претерпевает формоизменений;
- 2 – участок, в котором металл течет только в радиальном направлении

где  $(\sigma_i)_{пред}$ ,  $C$ ,  $C_1$  – постоянные, зависящие от марки стали, определяются расчетом по данным испытаний на растяжение;  $d_0$  – диаметр цилиндрического участка;  $\ell_1$  – длина участка.

Следует отметить, что усилие трения на первом участке уменьшается по мере уменьшения длины  $\ell_1$  по линейной зависимости.

Для определения усилия на втором участке деформирования используем метод баланса работ. Уравнение баланса работ можно записать так:

$$A_A = A_D + A_T + A_1, \quad (2)$$

где  $A_A$  – работа активных деформирующих сил;  $A_D$  – работа деформации на втором участке;  $A_T$  – работа сил контактного трения на торцевых участках пуансона и матрицы;  $A_1$  – работа сопротивления со стороны цилиндрического (первого) участка.

Работа внешних активных сил равна:

$$A_A = P \Delta h, \quad (3)$$

где  $\Delta h$  – уменьшение высоты заготовки.

Согласно [2] работа деформации на втором участке:

$$A_D = \iiint_V \sigma_S \varepsilon_i dV. \quad (4)$$

Рассмотрим этот участок, используя цилиндрические координаты. Разобьем его на две характерные зоны: зона А и зона Б (см. **рис. 1**). Тогда

$$A_D = A_{DA} + A_{DB} = \iiint_{V_A} \sigma_S \varepsilon_i dV_A + \iiint_{V_B} \sigma_S \varepsilon_i dV_B. \quad (5)$$

В зоне А деформация аналогична обычной осадке. Характерной особенностью деформации на этом участке является то, что деформация в осевом направлении  $\varepsilon_z$  постоянна и в любой точке очага деформации  $\varepsilon_z = -\frac{\Delta h}{h}$ .

Тогда, если принять напряжение текучести  $\sigma_s$  усредненным по всему очагу деформации, можно записать [2]:

$$A_{DA} = \left| \iiint_{V_A} \sigma_S \varepsilon_i dV_A \right| = \frac{\pi d_0^2}{4} \sigma_S \Delta h. \quad (6)$$

Характерной особенностью для зоны Б является то, что усилие деформирования действует не на контакте металла с инструментом, а со стороны зоны А. Если торцевые поверхности пуансона и матрицы выполнены наклонными к горизонтальной оси, то согласно **рис. 1** деформация в осевом направлении может быть определена как:

$$\varepsilon_z = -\frac{h-h_p}{h} - \frac{(\rho-r)\operatorname{tg}\varphi_1 + (\rho-r)\operatorname{tg}\varphi_2}{h}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – текущий радиус;  $r = \frac{d_0}{2}$ .

Обозначив  $\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi_2 = \varphi$ , получим:

$$\varepsilon_z = -\frac{(\rho-r)}{h} \varphi. \quad (8)$$

Таким образом, для осесимметричного напряженно-деформированного состояния в цилиндрических координатах выражения для главных деформаций будут иметь вид:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\partial U_\rho}{\partial \rho}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{U_\rho}{\rho}; \quad (10)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{(\rho-r)}{h} \varphi. \quad (11)$$

Согласно закона постоянства объема:

$$\varepsilon_\rho + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0,$$

или

$$\frac{\partial U_\rho}{\partial \rho} + \frac{U_\rho}{\rho} - \frac{(\rho-r)}{h} \varphi = 0. \quad (12)$$

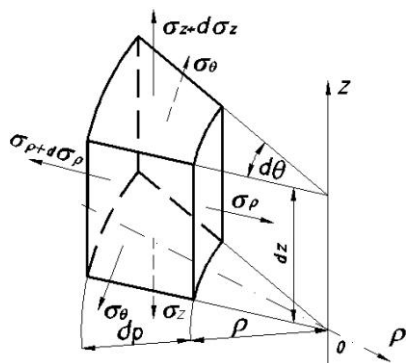


Рис. 2. К определению элементарного объема

Данное дифференциальное уравнение является линейным дифференциальным уравнением первого порядка. Общее решение этого уравнения запишется в виде:

$$U_\rho = \left[ \int d\rho \left( \frac{\rho-r}{h} \varphi \right) e^{\int \frac{1}{\rho} d\rho} + c \right] e^{-\int \frac{1}{\rho} d\rho}, \quad (13)$$

или

$$U_\rho = \frac{\varphi}{h} \left( \frac{\rho^2}{3} - \frac{r\rho}{2} \right) + \frac{c}{\rho}. \quad (14)$$

Постоянную  $c$  найдем из условия, что на границе зон А и Б при  $\rho=r$ , согласно [2], перемещение  $U_\rho = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} r$ .

Отсюда:

$$c = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} r^2 + \frac{1}{6} \frac{\varphi}{h} r^3; \quad (15)$$

$$U_\rho = \frac{\varphi}{h} \left( \frac{\rho^2}{3} - \frac{r\rho}{2} \right) + \left( \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} r^2 + \frac{1}{6} \frac{\varphi}{h} r^3 \right) \frac{1}{\rho}. \quad (16)$$

Тогда окончательные выражения для главных деформаций будут иметь вид:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\varphi}{h} \left( \frac{2}{3} \rho - \frac{r}{2} \right) - c \frac{1}{\rho^2}; \quad (17)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\varphi}{h} \left( \frac{\rho}{3} - \frac{r}{2} \right) + c \frac{1}{\rho^2}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\varphi}{h} (\rho - r). \quad (19)$$

Эти выражения удовлетворяют также условию неразрывности деформаций:

$$\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial \rho} = \frac{\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta}{\rho}. \quad (20)$$

Интенсивность деформации  $\varepsilon_i$  равна:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2 + (\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2}. \quad (21)$$

Подставляя в эту формулу выражения для деформаций (17)–(19), получим:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left[ \frac{\varphi}{h} \left( \frac{3}{2} r - \frac{5}{3} \rho \right) + \frac{c}{\rho^2} \right]^2 + \left[ \frac{1}{3} \frac{\varphi}{h} \rho - \frac{2c}{\rho^2} \right]^2 + \left[ \frac{\varphi}{h} \left( \frac{4}{3} \rho - \frac{3}{2} r \right) + \frac{c}{\rho^2} \right]^2} \approx \frac{\varphi}{h} (\rho - r) + \frac{c 2\sqrt{3}}{3\rho^2}. \quad (22)$$

Для определения  $dV$  выделим элементарный объем высотой  $dz$ , ограниченный цилиндрическими поверхностями с радиусами  $\rho$  и  $\rho+d\rho$  и радиальными поверхностями, расположенными друг относительно друга под углом  $d\theta$  (рис. 2).

Значение этого элементарного объема будет:

$$dV_B = \rho d\theta d\rho dz. \quad (23)$$

Тогда работа деформации для зоны Б определяется как:

$$\begin{aligned}
 A_{ДБ} &= \sigma_s \int_0^{2\pi R} \int_r^{h_\rho + (\rho-r)tg\varphi_2} \int_{(\rho-r)tg\varphi_2} \left[ \frac{\varphi}{h} (\rho-r) + \frac{2\sqrt{3}c}{3\rho^2} \right] \rho d\theta d\rho dz = \\
 &= 2\sigma_s \pi \left[ \frac{\varphi^2}{h} \left( -\frac{R^4-r^4}{4} + \frac{2r(R^3-r^3)}{3} - \frac{r^2(R^2-r^2)}{2} \right) + \right. \\
 &\left. + \varphi \left( \frac{R^3-r^3}{3} - \frac{r(R^2-r^2)}{2} - \frac{2\sqrt{3}}{3} c(R-r) \right) + \frac{2\sqrt{3}}{3} c \ln \frac{R}{r} (h+\varphi r) \right]. \quad (24)
 \end{aligned}$$

Работу трения на двух торцевых поверхностях определим по формуле:

$$\begin{aligned}
 A_T &= 2 \iint_F \tau_k U_\rho dF = 2\tau_k \int_0^{2\pi R} \int_r \left[ \frac{\varphi}{h} \left( \frac{\rho^2}{3} - \frac{r\rho}{2} \right) + \frac{c}{\rho} \right] \rho d\theta d\rho = 2\tau_k \int_0^{2\pi R} \int_r \left[ \frac{\varphi}{h} \left( \frac{\rho^2}{3} - \frac{r\rho}{2} \right) + c \right] d\theta d\rho \\
 &= 4\pi\tau_k \left[ \frac{\varphi}{h} \left( \frac{(R^4-r^4)}{12} - \frac{r(R^3-r^3)}{6} \right) + c(R-r) \right], \quad (25)
 \end{aligned}$$

где  $c = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} r^2 + \frac{1}{6} \frac{\varphi}{h} r^3$ .

Касательное напряжение на контактной поверхности  $\tau_k$  определяли как [2]:

$$\tau_k = \mu_2 \sigma_s,$$

где  $\mu_2$  – коэффициент трения на втором участке.

Подставляя уравнения (6), (24), (25) в уравнение (2) с учетом, что:

$$A_1 = P_1 \Delta h,$$

где  $P_1$  вычисляется по уравнению (1), получим выражение для осевой силы  $P$ :

$$\begin{aligned}
 P &= \pi r^2 \sigma_s + \frac{2\sigma_s \pi}{\Delta h} \left[ \frac{\varphi^2}{h} \left( -\frac{R^4-r^4}{4} + \frac{2r(R^3-r^3)}{3} - \frac{r^2(R^2-r^2)}{2} \right) + \right. \\
 &+ \varphi \left( \frac{R^3-r^3}{3} - \frac{r(R^2-r^2)}{2} - \frac{2\sqrt{3}}{3} c(R-r) \right) + \frac{2\sqrt{3}}{3} c \ln \frac{R}{r} (h+\varphi r) \left. \right] + \\
 &+ \frac{4\pi\tau_k}{\Delta h} \left[ \frac{\varphi}{h} \left( \frac{(R^4-r^4)}{12} - \frac{r(R^3-r^3)}{6} \right) + c(R-r) \right] + \mu_1 \sigma_s \pi d_0 \ell_1. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Таким образом, усилие деформирования в штампе с подпружиненным пуансоном можно записать:

$$P = P_1 + P_{ДА} + P_{ДБ} + P_T,$$

где  $P_1$  – осевое давление на первом участке;  $P_{ДА}$  – усилие деформации в зоне А;  $P_{ДБ}$  – усилие деформации в зоне Б;  $P_T$  – усилие затрачиваемое на преодоление сил трения на торцевых участках пуансона и матрицы.

## Библиографический список

1. Паршин В.Г., Артюхин В.И., Белан О.А Обеспечение продольной устойчивости при холодной штамповке заготовок с целью получения головок стержневых изделий увеличенных размеров // Эффективные технологии производства метизов: Сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 125–130.
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1971. 424 с.

УДК 621.771.0 1

В. М. Москвин, В. И. Кадошников, Е. Л. Белевская, Е. А. Данченко

## НАПРЯЖЕНИЯ В БАНДАЖЕ ОПОРНОГО ВАЛКА

В настоящее время на клетях кварто станов горячей и холодной прокатки применяются как цельные, так и составные опорные валки. Одним из способов крепления бандажа составного валка является его посадка на ось с натягом. В этом случае в бандаже возникают напряжения, которые определяют надёжность его крепления на оси и препятствуют смещению бандажа под действием внешних сил. В процессе прокатки металла на опорный валок действует распределённое по его длине усилие от рабочего валка и реакция опор. Это приводит к изгибу валка и упругому сплющиванию его в месте контакта с рабочим. Рассмотрим напряжения, которые возникают в бандаже опорного валка в результате упругой деформации сплющивания опорного валка и от действия натяга.

Напряжения в бандаже найдём наложением напряжения от упругого сплющивания на напряжение от натяга. Это возможно если: во-первых, напряжения и деформации связаны линейной зависимостью и, во-вторых, бандаж и ось деформируются совместно и не образуется зазора в месте их контакта.

Будем считать валок достаточно длинным цилиндром. Это позволяет определять усилия и напряжения в бандаже от натяга по тем же формулам,

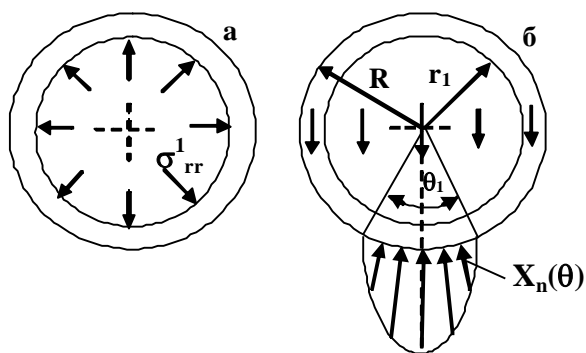


Рис. 1. Расчётные схемы нагружения бандажа: а – от натяга; б – от усилия прокатки

по которым ведётся расчёт симметрично нагруженных цилиндрических деталей [1] (рис. 1, а). Далее считаем, что давление  $q$  между опорным и рабочим валком распределено равномерно, и они изготовлены из материалов с близкими физическими характеристиками. Это позволяет считать деформацию валка в плоскости перпендикулярной оси – плоской. Напряжения в бандаже от упругого сплющивания определим расчётом напряжённого состояния опорного валка как единого целого цилиндра. Схема приложения внешних нагрузок к такому цилиндру в сечении перпендикуляром оси, показана на рис. 1, б. По отношению к внешним нагрузкам предполагается, что радиальное напряжение по границе круга распределено по закону косинуса, касательное напряжение отсутствует. Давление металла на опорный валок уравновешено равномерно распределёнными по сечению внешними силами (тяжёлый цилиндр). Формулы для расчёта напряжений в любой точке сечения, при такой схеме нагружения приведены в работе [2]. Там они получены из уравнений Колосова-Мусхелишвили с использованием теории функций комплексного переменного.

Чтобы представлять порядок цифр, с которыми приходится иметь дело при расчётах напряжённого состояния, положим:  $q = 9,8 \cdot 1,5$  МН/м (1500 т/м), диаметры рабочего и опорного валков соответственно  $D_p = 0,5$  м и  $D = 2 \cdot R = 1,6$  м, внутренний диаметр бандажа  $D_{вн} = 2 \cdot r_1 = 1,15$  м, модуль Юнга  $E = 21 \cdot 10^4$  МН/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , натяг  $\delta = 0,9 \cdot 10^{-3}$  м. Ширину полосы соприкосновения двух цилиндрических поверхностей определим по теории Герца [3], и применительно к принятым условиям контакта она равна  $2b_1 = 2,5,56 \cdot 10^{-3}$  м. Угол, под которым видна площадка контакта:  $2 \cdot \theta_1 = 2 \cdot b_1 / R$ , откуда  $\theta_1 = 0,00695$  рад. Среднее напряжение на площадке контакта  $\sigma_{cp} = q / (2 \cdot b_1)$ , и оно равно  $1,322 \cdot 10^3$  МН/м<sup>2</sup> (134,9 кг/мм<sup>2</sup>). Величина посадочного давления  $\sigma_{rr}^1 = 39,6$  МН/м<sup>2</sup>. Оно вычислено по формулам, приведённым в работе [1].

Вычисленные напряжения от натяга, усилия прокатки и от их совместного действия показывают, что в кольце, которое получается от пересечения бандажа с плоскостью, перпендикулярной его оси, можно выделить три области. Первая – это область, где напряжения принимают большие абсолютные значения и быстро изменяются. Она примыкает к линии контакта рабочего вала с опорным и определяется в полярной системе координат прямоугольником:  $0,96R \leq r \leq R$  и  $-0,8\theta_1 \leq \theta \leq 0,8\theta_1$ .

На рис. 2-4 приведены графики для радиальных  $\sigma_{rr} = \sigma_{rr}^1 + \sigma_{rr}^2$ , окружных  $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\theta\theta}^1 + \sigma_{\theta\theta}^2$  и касательных  $\tau_{r\theta}^2$  напряжений. На них они пред-

ставлены в виде двумерных поверхностей. Напряжения упругого сжатия  $\sigma_{rr}^2$ ,  $\sigma_{r\theta}^2$ ,  $\tau_{r\theta}^2$  вычислялись по формулам, приведённым в работе [2]. Поверхности хорошо передают качественный характер изменения напряжений. На них хорошо видны области, где напряжения принимают наибольшие значения. Радиальные и окружные напряжения достигают наибольших напряжений в середине линии контакта рабочего вала с опорным. Касательные напряжения (см. рис. 4) достигают наибольшего значения в приконтактном слое  $r \approx 0,996R$ . Более точную картину распределения напряжений в выделенной области кольца можно получить в прямоугольной системе координат  $x = r \cos(\theta)$ ,  $y = r \sin(\theta)$  с помощью линий равного

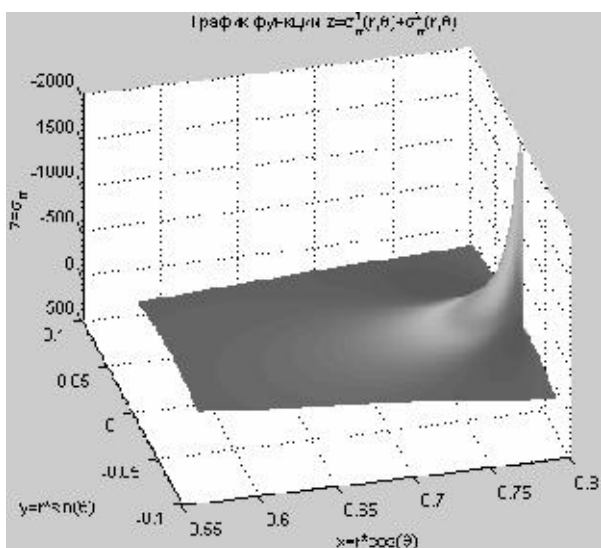


Рис. 2. Радиальные напряжения в бандаже опорного вала при  $r_1 \leq r \leq R$  и  $-4\theta_1 \leq \theta \leq 4\theta_1$

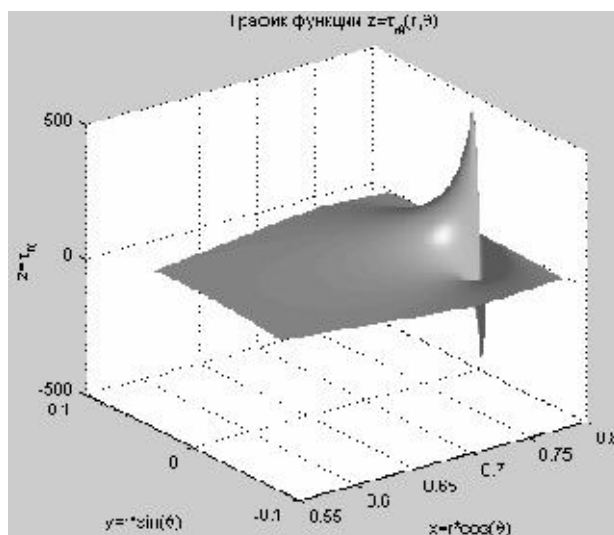


Рис. 4. Касательные напряжения в бандаже опорного вала при  $r_1 \leq r \leq R$  и  $-4\theta_1 \leq \theta \leq 4\theta_1$

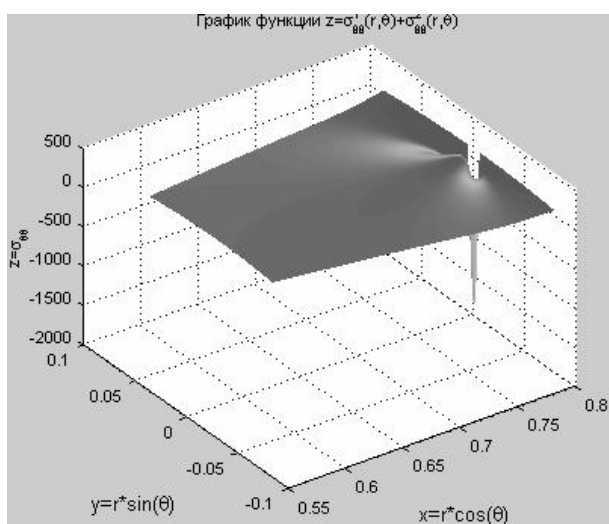


Рис. 3. Окружные напряжения в бандаже опорного вала при  $r_1 \leq r \leq R$  и  $-4\theta_1 \leq \theta \leq 4\theta_1$

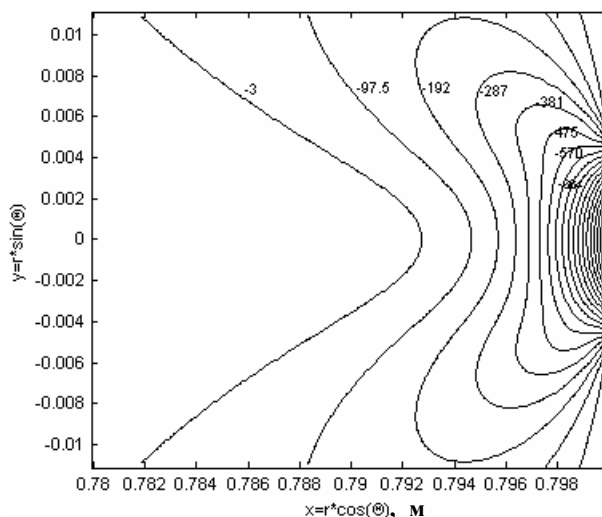


Рис. 5. Линии равных значений окружных напряжений



уровня напряжений. На рис. 5 и 8 приведены линии  $\sigma_{\theta\theta} = \text{const}$  и  $\tau_{r\theta} = \text{const}$ .

Ещё более точную информацию о характере изменения напряжений можно получить, рассматривая изменение напряжений в функции одного параметра. В полярной системе координат таким параметром может быть радиус валка  $r_1 \leq r \leq R$  при  $\theta = \text{const}$ , т.е. изменение напряжения по радиусу, либо угол  $\theta - \pi \leq \theta \leq +\pi$  при  $r = \text{const}$ , т.е. изменение напряжения по окружности.

На рис. 6 приведены графики изменения напряжений по радиусу при  $\theta = 0$ . На рисунке присутствуют графики изменения напряжений от

натяга (линии 1, 2) и графики от совместного действия натяга и усилия прокатки (линии 3, 4). Графики показывают, что свои наибольшие абсолютные значения радиальное и окружное напряжения достигают на линии контакта опорного валка с рабочим и они отрицательные, т.е. сжимающие. При смещении вглубь бандажа по радиусу окружное напряжение быстро убывает по абсолютной величине (линия 4), и при  $r = 0,97R$  оно практически совпадает с напряжением от натяга (линия 2). Иначе ведёт себя радиальное напряжение (линия 3). Для  $0,96R \leq r \leq R$  радиальное напряжение определяется только

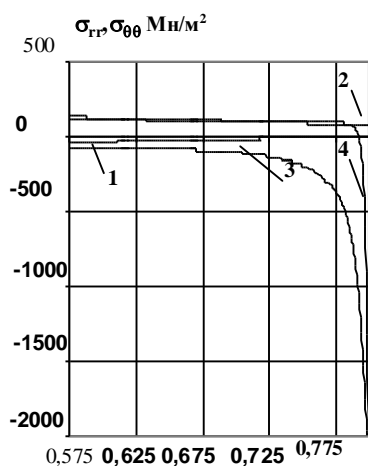


Рис. 6. Изменение напряжений в бандаже по радиусу валка: 1 –  $\sigma_{rr}$ ; 2 –  $\sigma_{\theta\theta}$  – от натяга; 3 –  $\sigma_{rr}$ ; 4 –  $\sigma_{\theta\theta}$  – от натяга и усилия прокатки;  $\theta = 0$

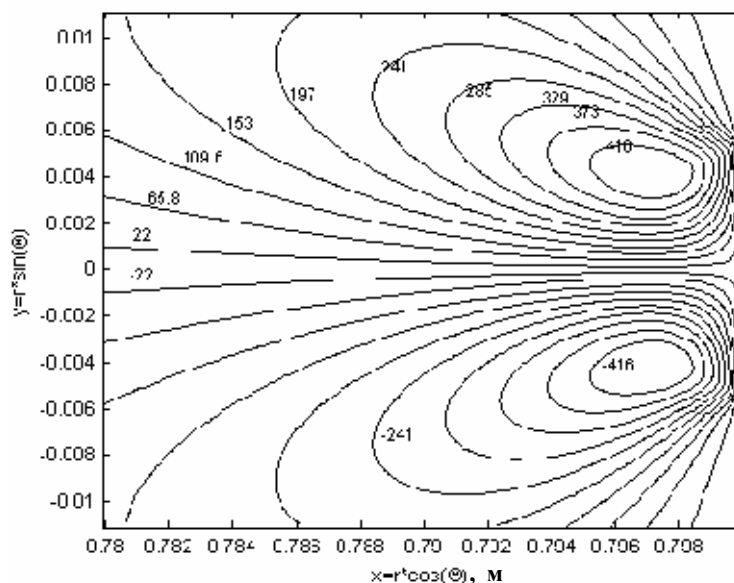


Рис. 8. Линии равных значений касательных напряжений

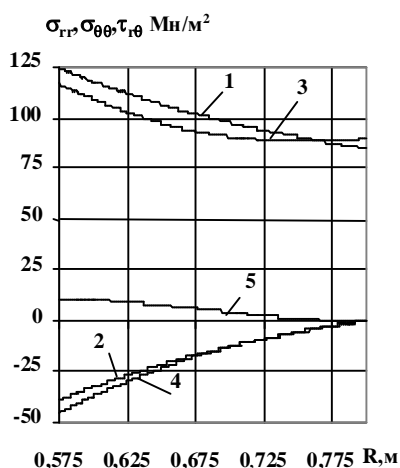


Рис. 7. Изменение напряжений в бандаже по радиусу валка: 1 –  $\sigma_{rr}$ ; 2 –  $\sigma_{\theta\theta}$  – от натяга; 3 –  $\sigma_{rr}$ ; 4 –  $\sigma_{\theta\theta}$ ; 5 –  $\tau_{r\theta}$  – от натяга и усилия прокатки при  $\theta = 40\theta_1$

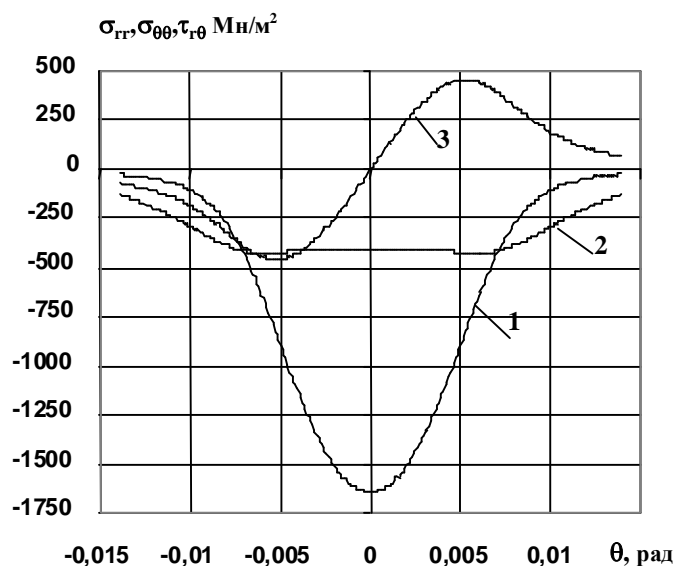


Рис. 9 Напряжения по окружности  $r = 0,996 \cdot R$  и  $-2\theta_1 \leq \theta \leq 2\theta_1$ : 1 –  $\sigma_{rr}$ , 2 –  $\sigma_{\theta\theta}$ , 3 –  $\tau_{r\theta}$

усилием прокатки и только при дальнейшем уменьшении  $r$  начинает сказываться влияние натяга (линия 1).

Характер изменения напряжений по окружности приведён на рис. 8. Радиус  $r=0,996R$  выбран не случайно. На этой окружности касательное напряжение достигает максимального значения (линия 3). Это напряжение зависит только от усилия прокатки и не зависит от натяга.

Вторая область в кольце – это область, в которой наряду напряжённое состояние определяется натягом и практически не зависит от усилия прокатки. В полярной системе координат она определяется так:  $40 \cdot \theta_1 \leq |\theta| \leq \pi$  и  $r_1 \leq r \leq R$ . На рис. 7 приведены

напряжения, построенные для её границы. Из этого графика видно, что общее радиальное (кривая 3) и радиальное от натяга (кривая 1), общее окружное (кривая 4) и окружное от натяга (кривая 2) практически совпадают. Вторая область занимает большую часть кольца, так как численное значение угла  $\theta_1$  невелико; оно имеет порядок  $10^{-2}$  рад. Поэтому напряжённое состояние – большая часть бандажа опорного вала определяется натягом.

Третья область – это та часть кольца, которая не вошла в первую и вторую области. Для каждой точки этой области напряжённое состояние зависит как от натяга, так и от усилия прокатки.

#### Библиографический список

1. Расчёт на прочность в машиностроении. Т. 2 / Пономарёв С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К. и др. М.: Машгиз, 1958. 975 с.
2. Напряжения в опорном валке в плоскости, перпендикулярной его оси / Москвин В.М., Кадошников В.И., Белевская Е.Л., Данченко Е.А. // Производство проката. 2006.
3. Шевченко К.Н. Основы математических методов в теории обработки металлов давлением. М.: Высш. шк. 1970. 352 с.

УДК 621.771.25 – 422.42

А. К. Белан, Е. Л. Кандауров

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ПРОКАТКИ ВЫСОКИХ ПОЛОС В ЧЕРНОВЫХ КЛЕТЯХ СОРТОВЫХ СТАНОВ

При освоении новых сортовых прокатных станов наиболее остро стоит задача выбора рациональных схем калибровки. При этом весьма эффективным может быть применение бескалибровой прокатки [1]. Однако возможности этого процесса ограничены из-за невысокой устойчивости полосы в валках. В связи с этим возникает задача по определению области применения бескалибровой прокатки, а также области применения того или иного вида ящичных калибров. Сравнение прокатки в гладких валках с прокаткой в ящичных калибрах и ящичных калибрах с защемлением может быть проведено на основе анализа устойчивости полосы в них.

Для решения задачи устойчивости высоких полос при различных схемах сортовой прокатки используем теорию устойчивости прямоугольных изотропных пластин в статической постановке [2]. Дифференциальные уравнения устойчивости такой пластины под действием внешних усилий получены Вольмиром А.С. [3] на основе теории деформации и Качановым Л.М. на основе теории пластического течения [4].

Прокатываемую полосу рассматриваем как пластину, нагруженную в её плоскости усилиями по двум противоположным сторонам (рис. 1).

В общем случае дифференциальное уравнение продольного изгиба для такой пластины имеет вид

$$\left( \frac{1}{4} + \frac{3\varphi_\kappa}{4\varphi_c} \right) \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \frac{b\sigma_i}{D_c} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi_\kappa = \frac{E_\kappa}{E}$ ;  $\varphi_c = \frac{E_c}{E}$ ;  $E_\kappa$ ,  $E_c$  и  $E$  – соответственно касательный модуль, секущий модуль и модуль упругости,  $E_\kappa = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ ;  $E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ ;  $\varepsilon$  – степень деформации;  $\omega$  – текущая величина прогиба;  $\sigma$  – нормальные напряжения на контактной поверхности;  $b$  – ширина полосы;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $D_c$  – цилиндрическая жесткость.

$$D_c = \left[ \frac{E_c b^3}{12(1-\nu^2)} \right]_{\nu=0,5} = \frac{E_c b^3}{9}. \quad (2)$$

Это уравнение вместе с граничными условиями является исходным для решения частных задач.

Принимая во внимание, что  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ,  $\sigma_x = \tau = 0$ , и полагая, что величина прогиба  $\omega$  не зависит от  $x$ , т.е. реализуется так называемая цилиндрическая форма потери устойчивости, получим:

$$\left(\frac{1}{4} + \frac{3\varphi_k}{4\varphi_c}\right) \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} + \frac{b\sigma}{D_c} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Обозначим

$$K^2 = \frac{b\sigma}{D_c \left(\frac{1}{4} + \frac{3\varphi_k}{4\varphi_c}\right)}. \quad (4)$$

Тогда уравнение (3) будет иметь вид

$$\frac{d\omega^4}{dy^4} + K^2 \frac{d^2 \omega}{d^2 y} = 0. \quad (5)$$

Решение этого уравнения можно записать в виде

$$\omega = A \cos Ky + B \sin Ky + Cy + D. \quad (6)$$

Коэффициенты этого уравнения  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  могут быть найдены исходя из граничных условий, которые, в свою очередь, определяются схемой прокатки.

В случае прокатки в гладких валках (см. рис. 1) в первом приближении можно рассматривать полосу как пластину, у которой один конец (нижний) закреплен, а другой (верхний) свободен. Для зашпеленного конца пластины имеем:

$$\text{при } y = 0; \omega = 0 \text{ и } \frac{d\omega}{dy} = 0.$$

На свободном конце пластины изгибающий момент должен обратиться в ноль, т.е. при

$$y = h; \frac{d^2 \omega}{dy^2} = 0. \text{ Кроме того, на верхнем конце}$$

пластины действуют поперечная сила  $Q$  от усилия прокатки и силы трения

$$Q = F \frac{d\omega}{dy} + F \cdot \mu \text{ при } y = h, \quad (7)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $h$  – средняя высота полосы.

Выражая поперечную силу через прогиб и проведя преобразования, можно записать

$$-\frac{d^3 \omega}{dy^3} = K^2 \frac{d\omega}{dy} + K^2 \mu \text{ при } x = h. \quad (8)$$

Используя данные граничные условия, находим

$$A = -D = -f; B = \frac{\mu}{K}; C = -\mu;$$

$$\cos Kh = 0 \text{ и } Kh = \frac{\sigma}{2}.$$

Подставляя эти значения в уравнение (6), находим решение уравнения (3):

$$\omega = f \left(1 - \cos \frac{\pi y}{2h}\right) - \mu \left(y - \frac{2h}{\pi} \sin \frac{\pi y}{2h}\right), \quad (9)$$

где  $f$  – прогиб на свободном конце.

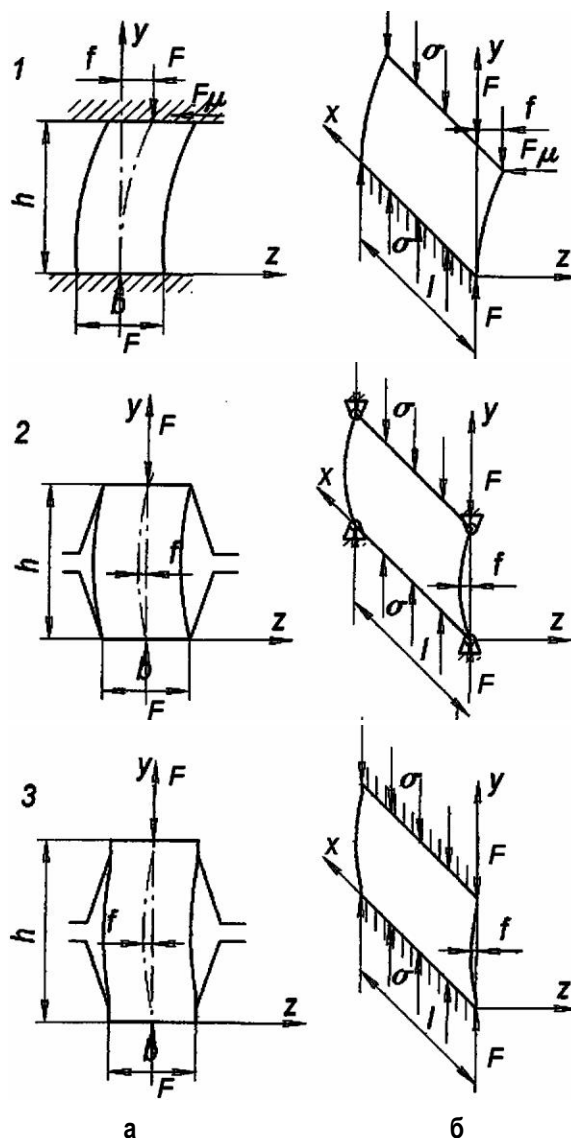


Рис. 1. Потеря устойчивости при прокатке высоких полос (а) и ее расчетная схема (б):

1 – в гладких валках; 2 – в ящичных калибрах; 3 – в ящичных калибрах с зашпелением

В случае прокатки в ящичных калибрах (см. рис. 1), допускающих возможность поворота полосы в донной части, граничные условия будут иметь вид: при  $y = 0, h$ ;  $\omega = 0$  и  $\frac{d^2\omega}{dx^2} = 0$ .

Решение уравнения (3) запишется в виде

$$\omega = f \sin \frac{\pi y}{h}. \quad (10)$$

При прокатке в калибрах с защемлением (см. рис. 1) граничные условия будут: при  $y = 0, h$ ;  $\omega = 0$  и  $\frac{d\omega}{dy} = 0$ .

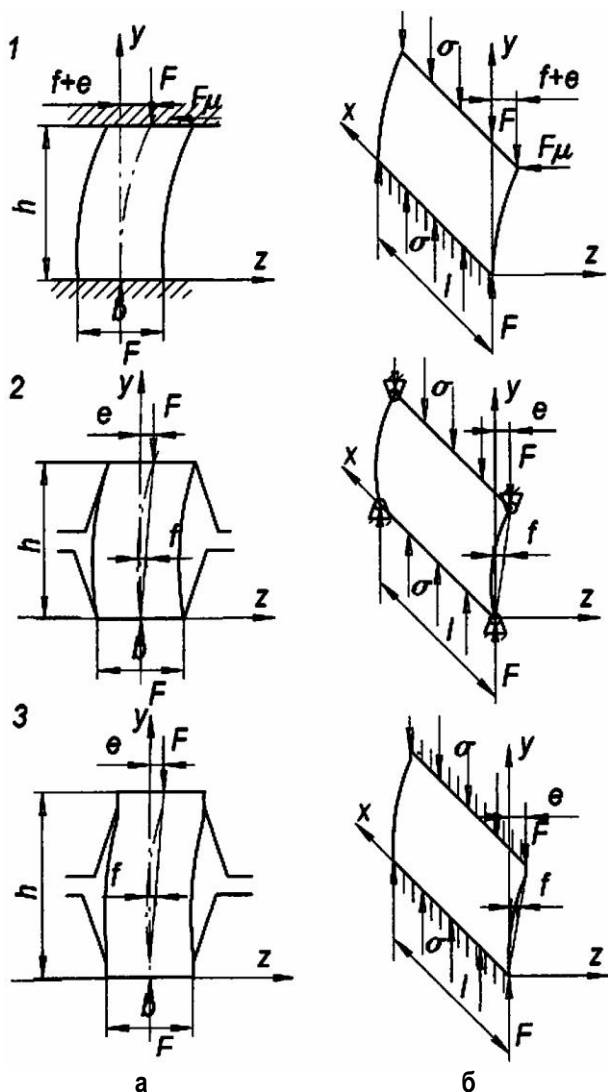


Рис. 2. Потеря устойчивости полос при несоосном нагружении (а) и ее расчетная схема (б):  
 1 – в гладких валках; 2 – в ящичных калибрах;  
 3 – в ящичных калибрах с защемлением при прокатке в ящичном калибре

Решение уравнения (3) в этом случае будет иметь вид

$$\omega = f \sin^2 \frac{\pi y}{h}. \quad (11)$$

Подставляя выражения (9)–(11) в уравнение (3) и проведя преобразования, получим выражение для нормального критического контактного напряжения.

$$\sigma_{кр} = \left( \frac{1}{4} + \frac{3\varphi_k}{4\varphi_c} \right) k \frac{\pi^2 D_c}{h^2 b}, \quad (12)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий схему прокатки:  $k = 0,25$  – для прокатки в гладких валках;  $k = 1,0$  – для прокатки в калибрах;  $k = 4$  – для прокатки в калибрах с замещением.

Выражение для критического усилия будет иметь вид:

$$F_{кр} = \left( \frac{1}{4} E_c + \frac{3}{4} E_k \right) k \frac{\pi^2 b_{cp}^3}{9} \frac{\sqrt{R\Delta h}}{h_0(h_0 - \Delta h)}, \quad (13)$$

где  $h_0$  – начальная высота полосы;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие;  $R$  – радиус валков.

Зная величину  $F_{кр}$ , можно выбрать наиболее рациональную схему прокатки, определяя тем самым области применения бескалибровой прокатки и прокатки в том или ином виде ящичных калибров.

Однако уравнение (13) получено для случая симметричного приложения нагрузки. В реальных процессах прокатки благодаря действию различных возмущающих факторов усилия со стороны верхнего и нижнего валков приложены с некоторым смещением (рис. 2).

В связи с этим появляется сваливающий момент, который снижает возможности того или иного способа прокатки.

Для анализа устойчивости различных способов прокатки при несоосном приложении нагрузки использовали дифференциальное уравнение (3). Решая это уравнение при тех же граничных условиях, получим:

для бескалибровой прокатки

$$f' = e \left( \frac{1}{\cos \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{F}{F_{кр}}}} - 1 \right) - \mu h \left( 1 - \frac{\sin \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{F}{F_{кр}}}}{\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{F}{F_{кр}}}} \right), \quad (14)$$

$$f = e \left( \frac{1}{\cos \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{F}{F_{кр}}}} - 1 \right); \quad (15)$$

при прокатке в ящичном калибре с защемлением

$$f = e \left( 1 - \frac{\pi \sqrt{\frac{F}{F_{кр}}}}{\operatorname{tg} \pi \sqrt{\frac{F}{F_{кр}}}} \right), \quad (16)$$

где  $f$  – максимальная стрела прогиба;  $e$  – величина смещения.

Анализ уравнений (14)–(16) показывает, что поведение прокатываемой полосы при несоосном приложении нагрузки оказывается качественно отличным от того, которое характерно для «классической» задачи устойчивости, т.е. для полосы, прокатываемой без смещения сил друг относительно друга. Прогиб возникает при малых значениях силы  $F$ , в то время как в случае прокатки без смещенного приложения нагрузки при  $F < F_{кр}$  полоса не должна прогибаться.

Полученные зависимости носят теоретический характер. В этих зависимостях, особенно при определении критической силы, заложены достаточно грубые допущения при выборе граничных условий для нахождения решения дифференциальных уравнений, т.е. при замене истинного характера потери устойчивости его расчетной схемой. Однако, как показывают результаты исследования, выбор этих граничных условий не оказывает практически никакого влияния на качественный характер полученных зависимостей. Полученные выражения для критической силы и относительной стрелы прогиба имеют для всех трех случаев однотипный характер. Отличие заключается лишь в количественных значениях отдельных коэффициентов.

Таким образом, приведенные зависимости дают представление о качественном процессе потери устойчивости. Для получения более точных количественных характеристик этого процесса необходимо проведение экспериментальных исследований влияния различных факторов на величину критических усилий. Это позволит использовать полученные результаты для выбора рационального способа прокатки.

#### Библиографический список

1. Технологические и экономические аспекты применения бескалибровой прокатки на стане 150 БМК / Л.Е.Кандауров, Б.А.Никифоров, А.К.Белан и др. // Производство проката. 1998. № 8. С. 43–45.
2. Бояршинов М.И. Пути экономии металла в листовом производстве // Обработка металлов давлением: Сб. науч. тр. Вып. 4. Магнитогорск, 1947. С. 13–24.
3. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Физматгиз, 1967. 984 с.
4. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.

УДК 621.771.2.09

А. Н. Макаров, И. М. Кутлубаев

## СИНТЕЗ СТРУКТУР МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ МАШИН С КИНЕМАТИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКОЙ ДВИЖЕНИЯ ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗВЕНЬЕВ

В многодвигательных машинах с наложенными связями функционирования кинематическая зависимость движения основных звеньев – звеньев, для движения которых предназначена машина, внешне проявляется в появлении относительного движения этих звеньев при заторможенных их двигателях [1]. В общем случае из-за кинематической зависимости движения основных звеньев их обобщенные относительные скорости  $\dot{q}$  связаны с обобщенными скоростями  $\dot{\phi}$  входных звеньев кинематических цепей системы

передач движений (СПД) в приводах следующим линейным преобразованием:

$$\dot{q} = U \cdot \dot{\phi}, \quad (1)$$

где  $U$  – кинематическая матрица СПД – матрица, задающая зависимость перемещений или скоростей выходных звеньев механической системы передач движений от перемещений или скоростей входных звеньев системы. Для традиционно построенных СПД, где приводы последующим звеньям “проходят” через предыдущие подвиж-

ные основные звенья, т.е. опоры элементов передаточных механизмов установлены на этих звеньях, кинематическая матрица имеет треугольную форму:

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & 0 & \dots & 0 \\ u_{21} & u_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n1} & u_{n2} & \dots & u_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Элементы  $u_{ij} = \partial q_i / \partial \varphi_j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) кинематической матрицы  $U$  представляют собой передаточные функции (передаточные отношения) от  $j$ -го входа СПД к  $i$ -му основному звену или частные передаточные отношения от  $i$ -го основного звена к  $j$ -му входному элементу системы передач движений при зафиксированных (неподвижных) остальных входных элементах. Передаточные отношения  $u_{ij}$  ( $i \neq j$ ), лежащие вне главной диагонали кинематической матрицы  $U$  и учитывающие влияние  $j$ -го привода при остановленных остальных приводах, на движение  $i$ -го основного звена исполнительного механизма, характеризуют перекрестные связи функционирования механизма [2]. Передаточные отношения  $u_{ij}$  ( $i=j$ ), принадлежащие главной диагонали матрицы  $U$ , характеризуют прямые связи функционирования механизма.

Явление кинематической зависимости движения в многодвигательных машинах может использоваться в положительных целях, например при получении стереотипных движений основных звеньев [3]. Но во многих случаях от этого явления приходится избавляться, т.е. осуществлять кинематическую развязку движения звеньев. Известны два подхода к кинематической развязке движения звеньев [1, 3].

При первом подходе строится традиционная кинематически зависимая система передач движений в многодвигательной машине, которая описывается кинематической матрицей  $U$ . Заданные законы относительного движения основных звеньев, и в том числе кинематическую развязку, в такой машине можно получить при помощи соответствующим образом построенной системы управления. Коррекция взаимовлияния движений осуществляется соответствующим включением приводных двигателей последующих звеньев, чтобы исключить влияние движений предыдущих звеньев, которое передается в исполнительном механизме по перекрестным связям, в соответствии с уравнением (1). В этом случае всегда должны работать все приводы последующих звеньев. Такой подход не является рациональным с точки зрения энергетических затрат, особенно в системах со значительными внешними нагрузками,

ухудшаются динамические свойства системы, усложняется программирование и управление в реальном масштабе времени [1].

При втором подходе кинематическая развязка движения основных звеньев достигается за счет соответствующего построения систем передач движения основным звеньям, в которых для кинематической развязки должны быть добавлены компенсирующие (избыточные) степени свободы. В этом случае кинематическая матрица СПД типа (2) должна принимать диагональную форму. Здесь известны три способа построения таких СПД. Первые два способа подразумевают построение кинематически развязанных СПД за счет введения в них последовательно или параллельно дополнительных передаточных механизмов к существующим механизмам с заданной кинематической матрицей  $U$ , которые преобразуют заданную кинематическую матрицу в диагональную кинематическую матрицу  $T$ . В основе этих систем передач движений лежат дифференциальные механизмы. При первом способе строится СПД с общим дифференциальным механизмом между силовым приводом и исполнительной системой многодвигательной машины, а во втором способе строятся СПД с независимыми двухпоточными кинематическими цепями. Теория и практика построения таких систем описаны в работах [1, 3].

Третий подход подразумевает построение независимых друг от друга приводов последующим звеньям многодвигательных машин, в которых кинематическая матрица  $U$  имеет сразу диагональную форму, без использования дополнительных передаточных механизмов и дифференциалов. Известны частные конструкции таких СПД, основанные на идее неизменности длины приводов последующих звеньев при изменении конфигурации основной кинематической цепи [1, 4]. Это характерно для многодвигательных машин, в которых в качестве связей строения – подвижных соединений между основными звеньями применяются вращательные пары. Однако общие принципы построения таких кинематически развязанных СПД для других сочетаний подвижностей в связях строения основных кинематических цепей не разработаны.

В статье на основании методики системного подхода к анализу построения исполнительных механизмов многодвигательных машин с помощью структурных схем, способы построения которых приведены в работе [1], дан анализ строения таких СПД для машин с двумя степенями свободы в основной кинематической цепи и различными комбинациями направлений движения по этим степеням свободы. Затем на основе обобщения этих результатов на многодвигательные

гательные машины с большим числом степеней свободы в ОКЦ формулируются общие принципы построения кинематически развязанных СПД с компенсирующими степенями свободы без применения дифференциальных механизмов.

На рис. 1 приведена структурная схема многодвигательной машины с двумя основными звеньями, которые показаны треугольными рамками с номерами звеньев. Прямоугольной рамкой показана стойка. Связи строения *a* и *b* с одной степенью свободы каждая показаны линиями без стрелок. Связи функционирования показаны линиями со стрелками (для машины это приводы и двигатели установлены на звеньях, откуда начинается линия) и обозначены римскими цифрами, соответствующими номеру звена, которое они приводят в движение по прямым связям. На рис. 1 движение от двигателя, установленного на основании, передается в направлении стрелки первому звену через связь функционирования *I*, а второму звену – через связь функционирования *II*. Пересечение связи функционирования с основным звеном обозначает, что опоры элементов передаточных механизмов в реальной конструкции установлены жестко на этом звене. На структурной схеме это пересечение говорит о том, что линия со стрелкой (связь функционирования) жестко соединена с линиями основного звена в местах пересечения и в этом месте не может перемещаться относительно основного звена.

По такой структурной схеме или на физической модели, выполненной по ней, можно наглядно продемонстрировать кинематическую зависимость движения основных звеньев. Так, например, при заторможенном приводе второго звена, что соответствует невозможности удлинения связи функционирования *II* на рис. 1, двигатель первого звена включен и начинается горизонтальное движение первого звена в направлении стрелки связи функционирования *I*, что соответствует ее удлинению. В связи с неизменностью длины линии *II* происходит уменьшение расстояния между звеньями, т.е. их относительное движение.

Для выработки принципов построения кинематически развязанного привода второму звену в структурные схемы двухзвенных систем введем направления движения по каждой степени свободы, которые обеспечивают связи строения. Направления возможного движения основного звена по каждой степени свободы из шести возможных и их номера показаны на рис. 2. На структурных схемах (рис. 3 и 4) эти направления движения основного звена проставляются на соответствующей связи строения, обеспечивающей его относительное движение, в виде прямых или круговых стрелок. Номерами из двух чисел около соответ-

ствующих схем обозначены возможные комбинации видов движений первого звена (первая цифра) и второго звена (вторая цифра). Было проанализировано тридцать шесть различных сочетаний из шести видов движений по два в каждой связи строения.

Анализ показал, что для кинематической развязки движения второго звена в структуру его привода необходимо ввести компенсирующую пассивную степень свободы, движение по которой должно быть аналогично виду движения первого звена, реализуемого в связи строения со стойкой (с предыдущим звеном). Компенсирующие степени свободы в приводе второго основного звена для простоты и наглядности изображались в виде условных обозначений, как в кинематических схемах.

Из тридцати шести комбинаций структурных схем были выделены четыре группы типовых структурных схем, представленных на рис. 3.

Эти схемы различаются по видам движений в компенсирующей степени свободы в приводе второго звена. Причем компенсирующая степень свободы вводится в структуру привода до места крепления элементов этого привода на первом звене, а направление и вид движения во второй связи строения не влияет на структуру привода.

Для структурных схем исполнительных механизмов многодвигательных машин второго вида [1], в которых связь функционирования второму звену проходит вне первого звена, т.е. ее элементы не закреплены на первом звене, компенсирующая степень свободы может вводиться в привод в любом месте по его длине (рис. 4, а), в частности в соединении привода с основным вторым звеном.

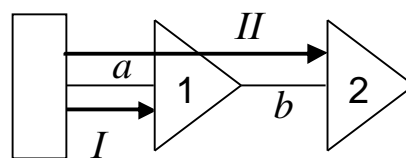


Рис. 1. Структурная схема многодвигательной машины

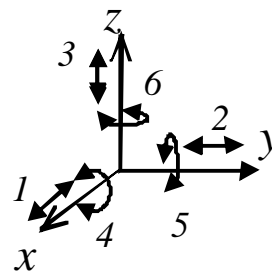


Рис. 2. Виды движений и соответствующие номера по каждой степени свободы

Если компенсирующая степень свободы в приводе второго звена вводится после первого звена (звена, от кинематического влияния движения которого необходимо избавиться), то опоры привода второго звена крепятся подвижно на первом звене (рис. 4, б). Причем направление возможного движения опор привода относительно первого звена соответствует возможному движению этого звена.

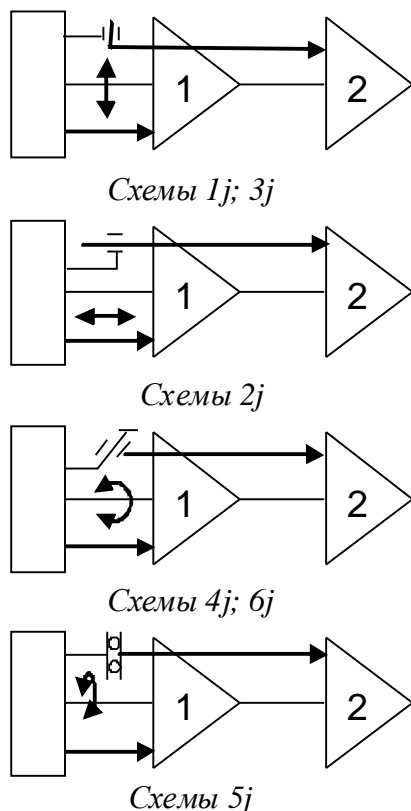


Рис. 3. Типовые структуры многодвигательных машин с двумя основными звеньями и кинематически развязанными приводами второго звена ( $j$  – принимает значения от 1 до 6)

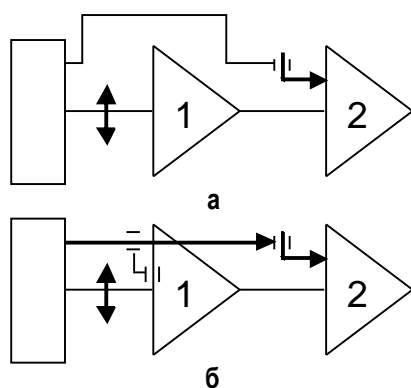


Рис. 4. Особенности построения многодвигательных машин с двумя основными звеньями и кинематически развязанными приводами второго звена

Распространяя опыт построения приводов кинематически развязанных механических систем с двумя степенями свободы в основной кинематической цепи многодвигательных машин на исполнительные механизмы с тремя (один из примеров структурной схемы такой системы показан на рис. 5) и более степенями свободы, можно сформулировать следующие основные принципы синтеза типовых приводов таких систем:

1. Для кинематической развязки движения основного звена по  $i$ -й степени свободы в структуру его привода необходимо ввести компенсирующие пассивные степени свободы. Направление и вид движения в связи строения по  $i$ -й степени свободы основного звена не влияет на структуру привода. Поэтому количество компенсирующих степеней свободы в приводе этого звена должно быть равно  $(i-1)$ .

2. Каждая  $k$ -я компенсирующая степень свободы вводится в структуру  $i$ -го привода до места крепления элементов этого привода на соответствующем основном звене, подвижность которого осуществляется по  $k$ -й степени свободы.

3. Направление движения по каждой компенсирующей степени свободы должно совпадать с видом движения по каждой степени свободы предыдущих звеньев

4. Ось симметрии элементов привода, вдоль которой передается движение основному звену по  $i$ -й степени свободы, должна совпадать или быть параллельной, как на схемах 2j, 5j (см. рис. 3), или быть перпендикулярной, как на схемах 1j, 3j, 4j, 6j (см. рис. 3), оси симметрии, определяющей направление движения в компенсирующей степени свободы.

5. На участке кинематической цепи привода основному звену по  $i$ -й степени свободы, где не выполняется условие 4, вводятся в общем случае три компенсирующие степени свободы, а для плоских механизмов – две.

6. Для структурных схем исполнительных механизмов многодвигательных машин второго вида, в которых привод  $i$ -му основному звену проходит вне предыдущих основных звеньев (отсутствует крепление элементов привода на

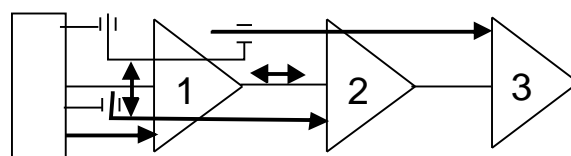


Рис. 5. Структурная схема 32j с кинематически развязанными приводами второго и третьего звена многодвигательных машин с тремя степенями свободы ( $j$  – принимает значения от 1 до 6)



этих звеньях), компенсирующие степени свободы могут вводиться в привод в любом месте по его длине до основного звена, на котором закреплены опоры этого привода.

7. Если не выполняется принцип 2, то компенсирующие степени свободы вводятся в соединениях опор этого привода с предыдущими основными звеньями. Причем направление возможного движения опор привода относительно соответствующего звена соответствует возможным движениям этого звена, которые обеспечиваются его связью строения (см. рис. 4, б).

8. Если в кинематической цепи привода основного звена по  $i$ -й степени свободы встречается более одной компенсирующей степени свободы с одинаковыми видами движения, то это может привести к неопределенности движений по компенсирующим степеням свободы в приводе. Для полной определенности этих движений необходимо в конструкцию привода вводить дополнительные устройства, которые за счет переменности кинематических свойств или силовых взаимодействий в одинаковых компенсирующих степенях свободы дают определенность в последовательности их работы.

Вышеперечисленные пять принципов построения приводов в многодвигательных машинах с наложенными связями функционирования являются необходимыми и достаточными условиями кинематической развязки движения основных звеньев.

Восьмой принцип обеспечивает достаточное условие вполне определенного функционирования компенсирующих степеней свободы такого привода.

На рис. 6 показаны известная кинематическая и структурная схемы многодвигательной машины (шагающий конвейер) для подачи рулонов проволоки к бунтовязальной машине. Это типичная конструкция с кинематической зависимостью движения второго звена от движения первого основного звена, соответствующие номера которых показаны на рисунке.

На рис. 7 показана та же машина, но с кинематической развязкой в приводе второго звена по типовой структурной схеме 32. Для выполнения условия 4 основных принципов построения кинематически развязанных систем приводной гидроцилиндр Ц2 закреплен так, чтобы ось штока была перпендикулярна оси движения первого звена.

Если осуществлять кинематическую развязку движения второго звена, не меняя расположение второго гидроцилиндра, т.е. оставить неизменной компоновку второго привода (см. рис. 6), то не выполняется условие 4. В этом случае согласно условию 5 на участке привода второму звену от

его двигателя Ц2 до шарнирного крепления штока со вторым звеном (подвижной рамой) надо ввести две компенсирующие степени свободы. Одна степень свободы, по которой вращательное движение в шарнирном соединении цилиндра со стойкой, в типовой конструкции уже присутствует. Вторую компенсирующую степень свободы – свободное движение штока вдоль оси цилиндра при неработающем приводе второго звена – можно обеспечить применением в системе управления гидроцилиндра Ц2 такого решения, при котором осуществляется свободное перетекание рабочей

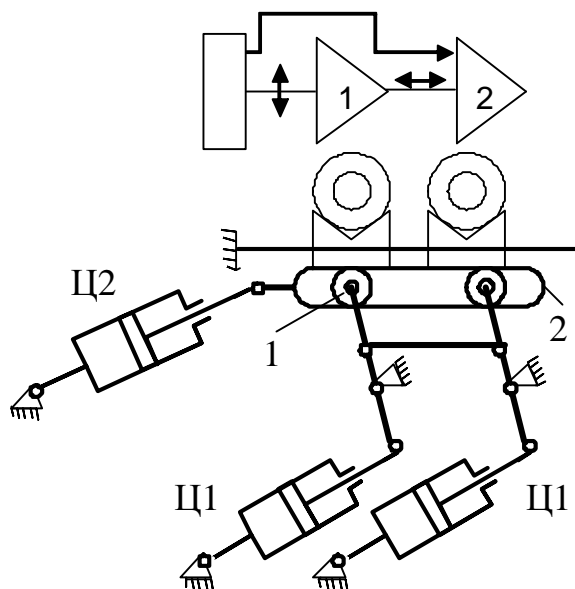


Рис. 6. Типовая схема машины для подачи бунтов проволоки

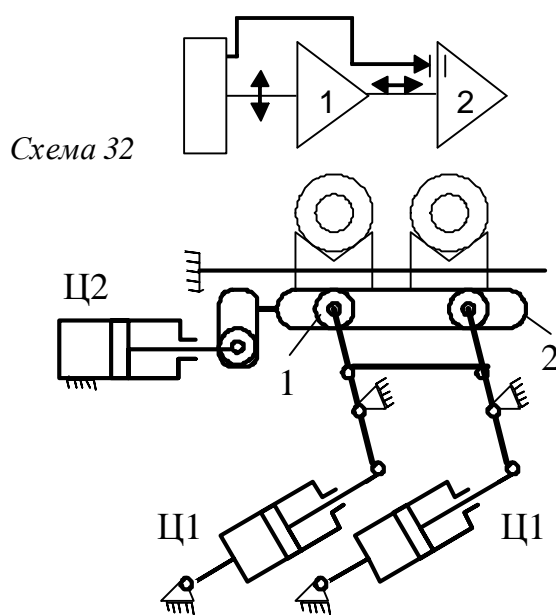


Рис. 7. Кинематически развязанная схема машины для подачи бунтов проволоки

жидкости в полостях гидроцилиндра. Это может быть схемное решение в системе управления гидроцилиндром Ц2 с включением дополнительного распределителя с гидравлическим управлением, осуществляющим принудительное управление потоками жидкости при перетекании ее из полости в полость гидроцилиндра, как это показано в работе [1]. В системе управления может также использоваться распределитель, который в нейтральном положении золотника позволяет свободно перетекать жидкости из полости в полость гидроцилиндра, например гидрораспределитель тридцать четвертого исполнения по схеме [5].

Схемы типа 444 использованы, например, в конструкциях манипуляторов с кинематической развязкой движения основных звеньев, в которых связи строения образуют вращательные пары. Кинематические схемы таких конструкций исполнительных механизмов манипуляторов, новизна которых подтверждена а.с. СССР № 1263520, 1321576 показаны на рис. 8.

Гибкие передающие связи пропускаются через элементы, которые при изменении конфигурации основной кинематической цепи, деформируясь, не изменяют свою длину, как, например, полые пружины, закрепленные концами между смежным и основными звеньями.

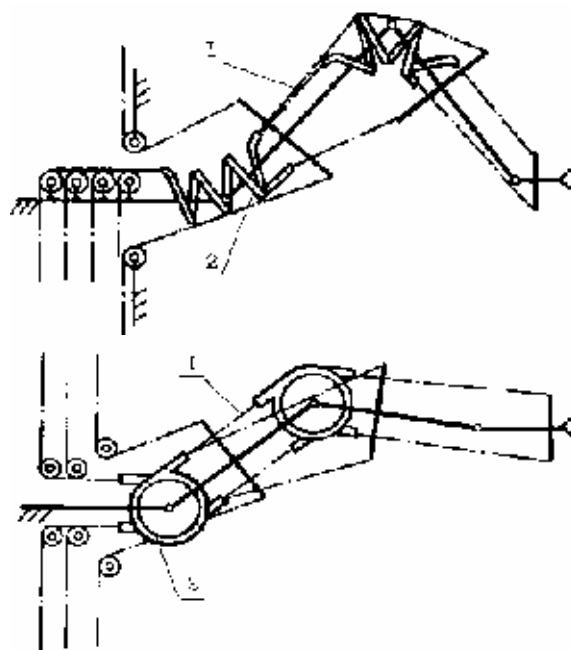


Рис. 8. Исполнительные механизмы манипуляторов с гибкими передающими звеньями 1 и упругими элементами 2 с неизменяемой длиной

#### Библиографический список

1. Макаров А.Н., Кутлубаев И.М. Механика манипуляционных систем: Монография. – Магнитогорск: МГТУ им.Г.И.Носова, 1999. 178 с.
2. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: В 3 кн. / Под ред. К.В.Фролова, Е.И.Воробьева. Кн. 2: Расчет и проектирование механизмов / Е.И.Воробьев, О.Д.Егоров, С.А.Попов. М.: Высш. шк., 1988. 367 с.
3. Манипуляционные системы роботов / А.И.Корендясев, Б.Л.Саламандра, Л.И.Тывес и др.; Под общ. ред. А.И.Корендясева. М.: Машиностроение, 1989. 472 с.
4. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 560 с.
5. Свешников В.К., Усов А.А. Станочные гидроприводы: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1988. 512 с.

УДК 621.752

А. А. Кудряшов, Д. А. Решетников

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЗОЛОТНИКОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ В ГИДРОПРИВОДАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Одной из основных тенденций конструктивного совершенствования металлургических машин является все большее применение систем гидропривода. Вместе с тем, сложные условия эксплуатации (повышенная запыленность, высокие температуры и динамические нагрузки) приводят к преждевременному выходу гидропривода из строя, что снижает общую эффективность эксплуатации машин.

Необходимым условием поддержания высокого уровня надежности гидропривода является

своевременное диагностирование его технического состояния, которое позволяет вовремя определять и устранять возникающие в нем неисправности.

Одним из наиболее ответственных аппаратов гидропривода являются золотниковые гидрораспределители. При их нештатной работе возникают аварийные ситуации, связанные, например, с несанкционированным движением рабочего органа (гидроцилиндра, гидромотора), либо простой оборудования.

Главной причиной выхода из строя гидрораспределителей при правильной эксплуатации гидропривода является износ в паре золотник-корпус. Это происходит из-за попадания в рабочую жидкость посторонних примесей абразивного характера (пыль, окалина и т. п.). Поэтому для надежной работы гидропривода необходимо обеспечить оперативный контроль чистоты рабочей жидкости и состояния распределителей.

В настоящее время нет эффективно работающей системы диагностирования гидрораспределителей, отвечающей требованиям по оперативности и полноте информации о техническом состоянии аппарата. Кроме того, диагностику целесообразно проводить без остановки оборудования и снятия гидрораспределителя с рабочей позиции.

Для решения проблемы оперативной оценки технического состояния золотникового распределителя предлагается установить зависимость между виброакустическими характеристиками, создаваемыми гидрораспределителем, и техническим состоянием пары золотник-корпус.

Предлагаемый способ диагностирования гидрораспределителей содержит следующие этапы:

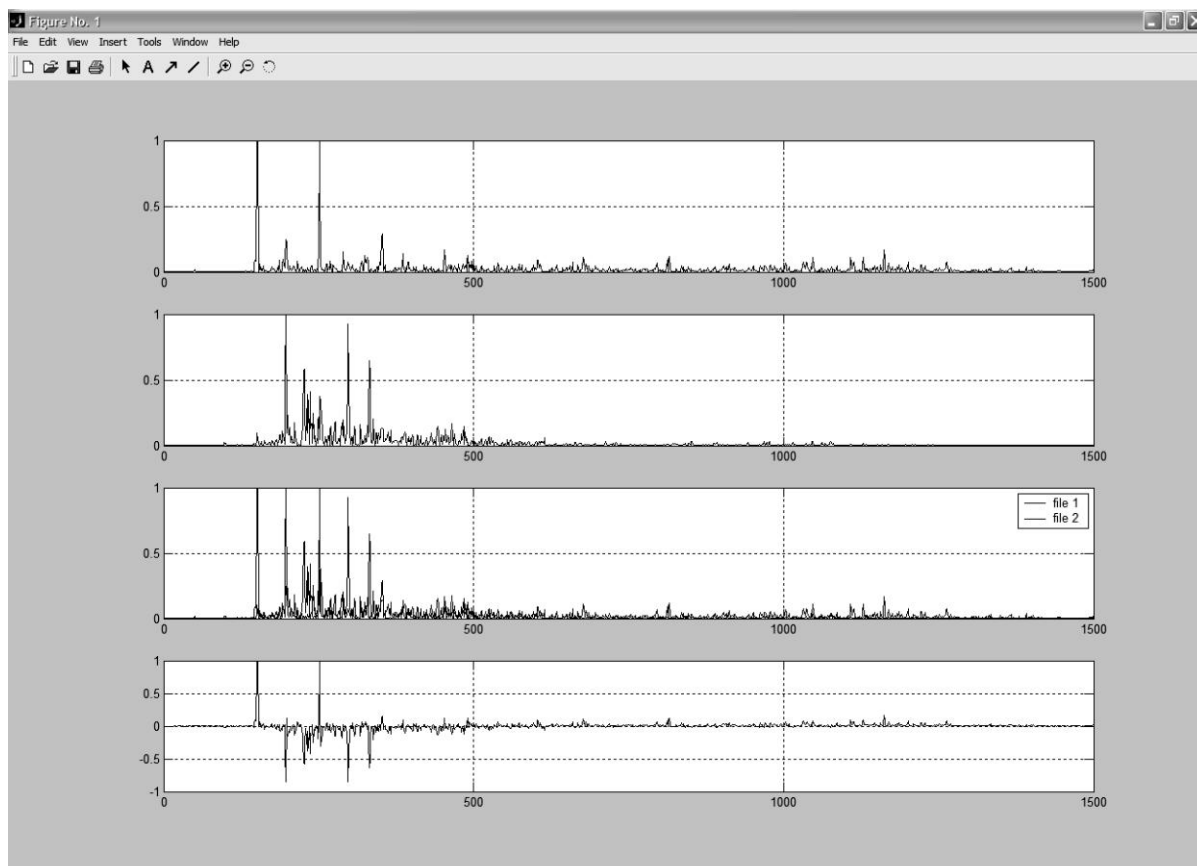
1. Первоначальное тестирование гидрораспределителей на испытательном стенде с фиксирова-

нием зависимости виброакустических характеристик от технического состояния золотника. Одновременно с этим необходимо создать базу данных, отражающую данную зависимость по нескольким типоразмерам гидрораспределителей.

2. Тестирование гидрораспределителей непосредственно на рабочей позиции. Применяя базу данных, созданную на первом этапе, делаются выводы о техническом состоянии золотника гидрораспределителя.

Предусматривается автоматизация всех диагностических операций от калибровки системы при замене распределителя, до прогнозирования выхода его из строя и сигнализации при критическом износе.

В условиях ЛПЦ-5 ОАО «ММК» проводились замеры акустических шумов, создаваемых гидрораспределителями, находящимися на разных стадиях технического состояния, непосредственно на рабочей позиции. Акустические шумы с распределителей снимались и записывались на магнитную ленту с помощью акустического щупа-фонендоскопа на основе динамического микрофона. Далее они обрабатывались с помощью программ Sony Sound Forge, Adobe Audition и Acoustika.



Графическое отображение процедуры сравнения характеристик двух акустических сигналов

Волновые процессы, происходящие при работе гидрораспределителей, являются полигармоническими колебаниями, поэтому для анализа их необходимо раскладывать в ряды Фурье. Сигнал, состоящий из спектра гармонических колебаний, можно представить в виде

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_k e^{i2\pi k/T} = \sum_{-\infty}^{\infty} C_k e^{ik\omega_1 t},$$

где  $T$  – период колебаний;  $k\omega_1$  – угловая частота колебаний;  $k$  – целые числа;  $C_k = c_k e^{-i\varphi_k}$  – комплексная амплитуда;  $c_k$  – амплитуда гармоники;  $\varphi_k$  – ее начальная фаза.

Спектр тонального сигнала с некрратными частотами  $\omega_k$  имеет вид

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(\omega_k t + \varphi_k),$$

где  $\omega_k$ ,  $c_k$  и  $\varphi_k$  – частоты, амплитуды и фазы составляющих:

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \text{tg } \varphi_k = b_k / a_k,$$

где  $a_k$  и  $b_k$  – коэффициенты Фурье.

Для автоматизации процессов виброакустического анализа в среде математического пакета MATLAB была разработана программа, позволяющая решать задачи сравнения текущего состояния объекта (гидрораспределителя) с эталонным, а результат такого сравнения соотносить с набором классифицирующих функций, с помощью которых производится распознавание параметров акустического сигнала.

Пример результатов работы программы показан на рисунке. По оси абсцисс отложены амплитуды звуковых колебаний в Дб, по оси ординат – частоты в Гц.

Были проведены эксперименты по оценке технического состояния распределителей, находящихся в гидросистеме дрессировочного стана 1700 ЛПЦ-5 ОАО «ММК».

На основании данных, полученных при проведении анализа результатов, выявленных при обработке акустических характеристик, снятых с гидрораспределителей, можно сделать следующий вывод: частота акустических колебаний, наблюдающихся в гидрораспределителях, понижается с увеличением срока службы аппарата, т. е. с увеличением износа в паре золотник-корпус.

#### Библиографический список

1. Иофе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А.. Справочник по акустике. М.: Связь, 1979. 312 с.
2. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. / Ред. совет: В.Н.Челомей (пред.). Т. 1: Колебания линейных систем / Под ред. В.В.Болотина. М.: Машиностроение, 1978. 352 с.
3. Гринчар Н.Г. Прогнозирование остаточного ресурса гидроприводов // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 3. С. 34–35.

УДК 621.771

С. А. Зайдес, Л. Г. Климова, С. А. Пронькина

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ ПРИ ОХВАТЫВАЮЩЕМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Калиброванный металл является эффективным видом заготовок в технологии машиностроения. Его используют при изготовлении, например, рабочих и трансмиссионных валов артезианских турбинных насосов, валов и осей для зерноуборочных комбайнов и другой сельскохозяйственной техники. Механической обработке при этом подвергаются лишь небольшие поверхности заготовок. Автоматная сталь (А12, АС14 и др.) специально предназначена для изготовления деталей на станках-автоматах и автоматических линиях.

Более широкому использованию холодноотянутого металла в промышленности препятствует нестабильность его формы, проявляющаяся в виде

искривления на всех этапах технологического процесса изготовления, сборки, транспортировки и хранения изделий. Известны случаи растрескивания латунных и стальных прутков при калибровке и механической обработке (рис. 1).

Основной причиной таких и подобных дефектов являются технологические остаточные напряжения, которые формируются в процессе холодного деформирования и распределяются по всему объему заготовки. Значительное влияние остаточные напряжения оказывают на искривление деталей при механической обработке. Например, при фрезеровании продольных шлицев или шпоночных канавок напряжения освобождаются только с

одной стороны вала и распределяются несимметрично. Это приводит к значительному перекосу шпоночной канавки и искривлению вала [1]. Поэтому с точки зрения точности обработки образование остаточных напряжений является, в принципе, отрицательным фактором. Это относится в равной мере как к растягивающим, так и к сжимающим напряжениям.

В теории пластического деформирования металлов известно, что, если создать в материале напряженное состояние, соответствующее пределу текучести, то имеющиеся упругие несовершенства устраняются и остаточные напряжения снимаются. В производственных условиях для формирования в поверхностных слоях остаточных напряжений сжатия используются методы поверхностного пластического деформирования (обкатка шариками, роликами, дисками, алмазами и др.).

Однако размеры деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием изменяются незначительно. С повышением величины натяга уменьшается шероховатость поверхности, но до определенного предела, за которым начинается схватывание, перенаклеп и шелушение металла [1]. При упрочнении длиномерных мало жестких валов и тонкостенных цилиндров возникают деформации и прогибы, для предот-

вращения которых приходится жертвовать производительностью технологического процесса.

Ряд указанных проблем можно успешно решить, если вместо локальных методов упрочнения применять охватывающее деформирование. Для реализации метода необходим рабочий инструмент в виде жесткой матрицы, через который продавливают или протягивают заготовку. К преимуществам охватывающего деформирования по сравнению с локальным следует отнести [2] высокую производительность (в десятки раз выше), большую глубину упрочненного слоя (вплоть до оси), низкую шероховатость (соответствует отделочным процессам), широкие возможности изменения поперечных размеров (в 20–50 раз выше, чем при локальных процессах). Одна из причин редкого использования охватывающего деформирования в машиностроении заключена в отсутствии эффективных способов регулирования возникающих остаточных напряжений. Рассмотрим возможность активного изменения их в основном технологическом процессе.

Для определения осевых  $\sigma_z$ , тангенциальных  $\sigma_\varphi$  и радиальных  $\sigma_r$  остаточных напряжений в осесимметричных телах более полную и надежную информацию дает метод обтачивания и растачивания цилиндрических образцов [3]. Сплошной цилиндр длиной не менее трех диаметров вначале рассверливается, а затем послойно растачивается. После удаления очередного концентрического слоя металла определяются геометрические изменения длины и наружного диаметра цилиндра. На втором этапе обработки удаляются наружные слои металла путем тонкого обтачивания или стравливания с последующим измерением внутреннего диаметра и длины образца. Далее определяются относительные осевые и тангенциальные деформации по сечению цилиндра, а затем вычисляются компоненты тензора остаточных напряжений [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E}{1-\nu^2} \left( r \cdot f \frac{d\lambda}{dr} - \lambda \right); \\ \sigma_\varphi &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[ r \cdot f \frac{d\theta}{dr} - (1+f)\theta \right]; \\ \sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} f \cdot \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\lambda = \varepsilon_z + \varepsilon_\varphi \nu$ ;  $\theta = \varepsilon_\varphi + \nu \varepsilon_z$ ;  $f = \frac{A - A_t}{2A_t}$ ;  $E$  – модуль упругости материала при растяжении,

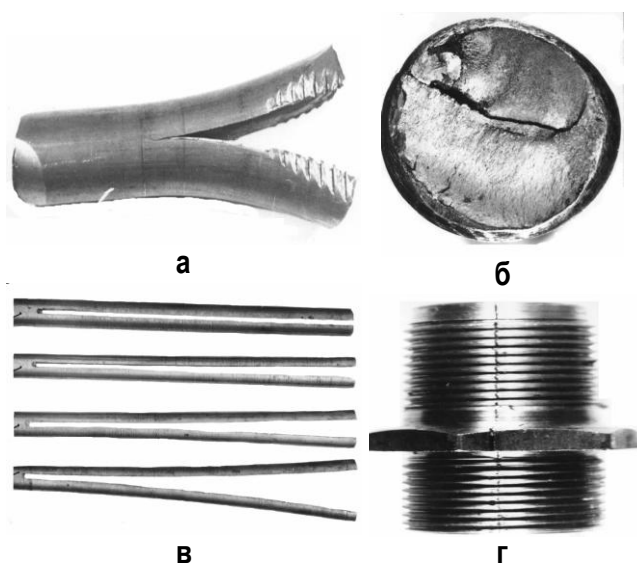


Рис. 1. Дефекты изделий, изготовленных из калиброванного металла:

- а – раскрытие конца прутка при выходе из матрицы;
- б – трещина на конце заготовки после холодного деформирования;
- в – искажение формы заготовки при фрезеровании продольного паза;
- г – трещина на поверхности детали после обработке резанием на станке-автомате

сжатии;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $A$  – площадь поперечного сечения сплошного цилиндра;  $A_i$  – площадь поперечного сечения удаленной части цилиндра;  $\varepsilon_z, \varepsilon_\varphi$  – относительные осевые и тангенциальные деформации цилиндра при удалении концентрических слоев материала;  $r$  – текущий радиус цилиндра.

Для определения остаточных напряжений образец или деталь приходится безвозвратно разрушать, но для изделий массового производства или заготовок из проката это не является большой проблемой. Рассмотрим некоторые результаты экспериментального определения остаточных напряжений при охватывающем деформировании цилиндрических прутков ( $d = 36$  мм) из автоматной стали АС14.

Основными технологическими параметрами процесса охватывающего деформирования являются:

степень относительного обжатия  $Q$ , угол конуса рабочей зоны  $2\alpha$  и длина  $L_k$  цилиндрической зоны инструмента, скорость деформирования –  $V$ , предел прочности  $\sigma_u$  деформированного металла, диаметр заготовки –  $D$ . Причем изменяются эти параметры в следующих пределах:  $Q = 0...30$  и более процентов за один проход,  $2\alpha = 3...30$  град,  $L_k = (0,2...2,0)d$ , где  $d$  – диаметр цилиндрической зоны инструмента,  $V = 0,1...30,0$  м/мин и более,  $\sigma_u = 100...500$  МПа и более,  $D = 10...80$  мм.

### Степень относительного обжатия

В практике бытует мнение, что с увеличением степени упрочнения остаточные напряжения возрастают. Однако такое представление является несколько упрощенным. Во-первых, если выразить тензор напряжений через главные напряжения, то при отсутствии деформации кручения их

будет три вида – осевые, радиальные и тангенциальные. Экспериментально установлено [4], что с увеличением степени деформации возрастают радиальные и тангенциальные напряжения, а осевые снижаются (рис. 2). Так, при увеличении обжатия от 5 до 35% тангенциальные остаточные напряжения растяжения возрастают в 2,5 раза, а осевые уменьшаются на 10–15%.

Во-вторых, при охватывающем упрочнении с весьма малыми обжатиями характер распределения напряжений по сравнению с характером напряжений после больших деформаций меняется на противоположный [4]. Так, экспериментально установлено, что при деформировании стальных прутков повторным обжатием величиной 0,3% максимальные тангенциальные напряжения растяжения снизились в три, а осевые в два раза (рис. 3). Более того, остаточные напряжения растяжения в поверхностных слоях преобразовались в

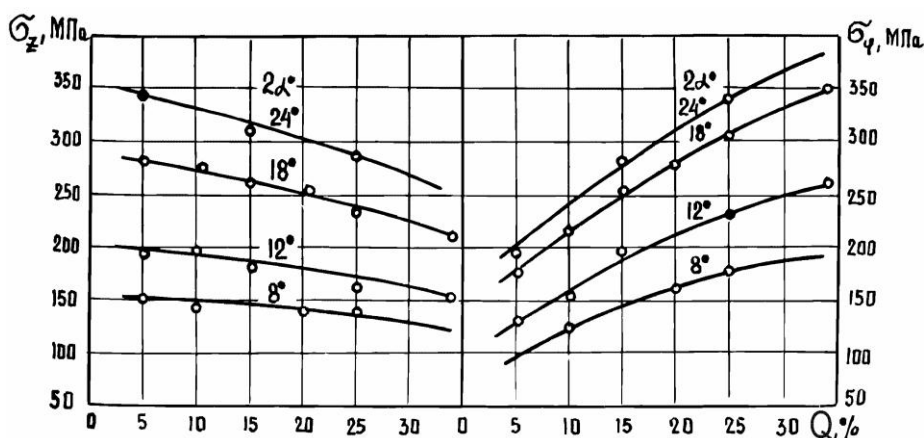


Рис. 2. Влияние степени обжатия на максимальные значения осевых и тангенциальных остаточных напряжений

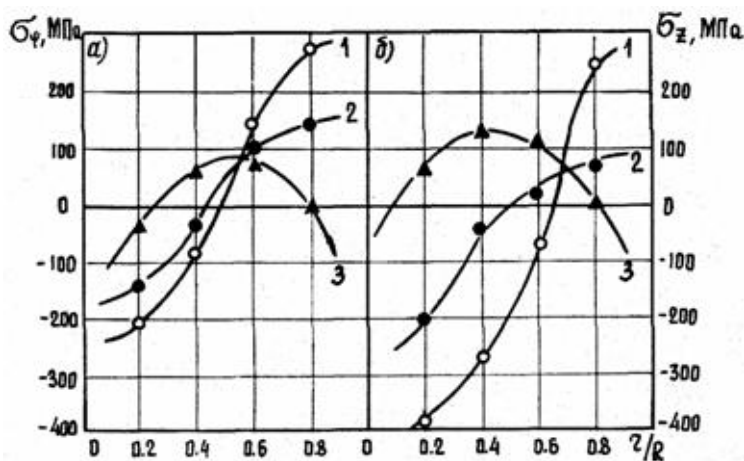


Рис. 3. Распределение тангенциальных и осевых остаточных напряжений при деформировании прутков с основным и дополнительным малым обжатием:

1 –  $Q = 15\%$ ; 2 –  $Q = 15\%$ ,  $Q_{доп} = 0,6\%$ ; 3 –  $Q = 15\%$ ,  $Q_{доп} = 0,3\%$

напряжения сжатия. При обжатиях меньше и больше 0,3% (до 0,6–0,8%) остаточные напряжения тоже существенно снижаются, но без изменения характера распределения.

Для повышения производительности труда дополнительное обжатие можно совмещать с основным, используя сборные сдвоенные матрицы. Экспериментально установлено, что деформирование через сборные матрицы сказывается более существенно на снижении остаточных напряжений. Так, при отдельной обработке максимальные значения тангенциальных напряжений растяжения снизились с 250 до 90 МПа, а осевых – с 210 до 100 МПа. При использовании сборного инструмента тангенциальные растягивающие напряжения в поверхностных слоях преобразовались в напряжения сжатия (200 МПа) [4].

### Угол конуса рабочей зоны матрицы

Экспериментально установлено, что угол конуса рабочей зоны в диапазоне от 8 до 24 град не влияет на характер распределения остаточных напряжений в калиброванных прутках, но существенно сказывается на их величине. Так, при использовании матрицы с углом  $2\alpha = 24^\circ$  (обжатие 4%) максимальные осевые напряжения достигают 350 МПа (см. рис. 2), а при  $2\alpha = 8^\circ$  – 150 МПа.

Установлено также, что рабочий угол оказывает на осевые остаточные напряжения больше влияние, чем на тангенциальные. Например, при изменении  $2\alpha$  от 8 до  $24^\circ$  максимальные осевые напряжения растяжения возрастают в 2,3 раза, а тангенциальные – в 1,16 раза. Выявлено также и значение оптимального угла инструмента ( $2\alpha = 8^\circ$ ), при котором формируются минимальные по величине остаточные напряжения.

### Длина калибрующей зоны матрицы

Основное назначение калибрующей зоны инструмента – обеспечение стабильности диаметрального размера. Обычно длина этой зоны составляет 0,1–0,2 калибрующего диаметра. С использованием метода планирования экспериментов получены уравнения регрессии для максимальных значений осевых и тангенциальных остаточных напряжений ( $2\alpha = 24^\circ$ ,  $V = 100$  мм/мин)

$$\begin{aligned} \sigma_{z(\max)} &= 245 - 0,5Q - 5,5L_k - 25QL_k; \\ \sigma_{\varphi(\max)} &= 257,5 + 57,5Q - \\ &- 52,5L_k - 12,5QL_k. \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из полученных результатов, с увеличением длины калибрующей зоны инструмента компоненты тензора остаточных напряжений снижаются. Причем влияние  $L_k$  соизмеримо с влиянием  $Q$  и даже выше (для  $\sigma_{z(\max)}$ ). Однофакторные эксперименты подтвердили полученные результаты. Так, при  $L_k/d = 0,08$   $\sigma_{z(\max)} = 360$  МПа, а при  $L_k/d = 0,49$   $\sigma_{z(\max)} = 145$  МПа.

С учетом того, что компоненты тензора остаточных напряжений снижаются как от уменьшения угла рабочего конуса матрицы, так и от увеличения длины калибрующей зоны, были поставлены контрольные опыты для выявления эффекта от одновременного действия обоих факторов. Предположение о получении положительного результата подтвердилось: максимальное значение, например, осевых остаточных напряжений уменьшилось в семь раз.

Влияние на величину остаточных напряжений растяжения скорости деформирования  $V$ , предела прочности материала  $\sigma_{\%}$ , диаметра  $d$  и длины калибрующей зоны инструмента  $L_k$  отражено на рис. 4 в виде поправочных коэффициентов, кото-

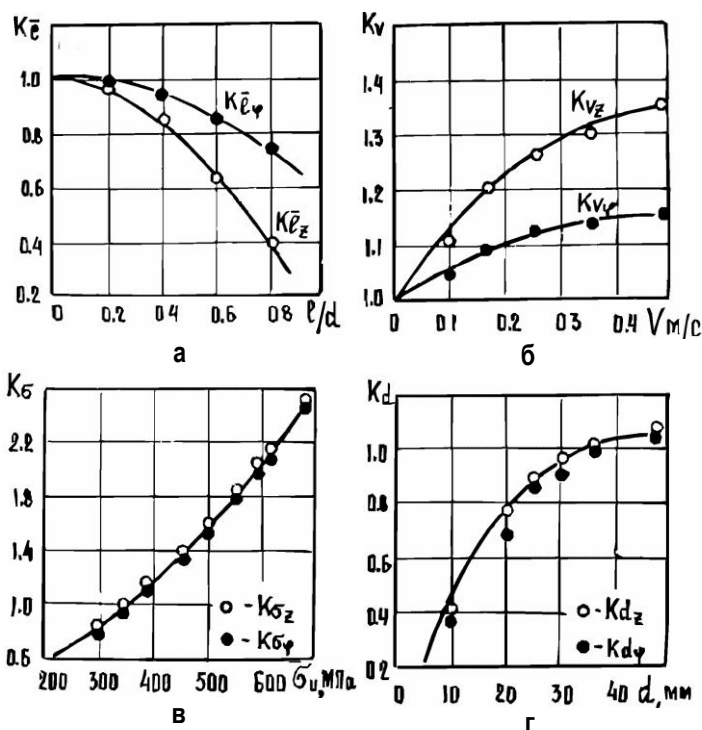


Рис. 4. Изменение поправочных коэффициентов в зависимости от относительной длины калибрующей зоны инструмента  $l = L_k/d$  (а), скорости деформирования  $V$  (б), предела прочности материала  $\sigma_{\%}$  (в), диаметра заготовки  $d$  (г)

рые представляют собой отношение соответствующих напряжений к некоторому “номинальному” значению, которое получено при деформировании прутков из стали А12 диаметром 36 мм с параметрами:  $V = 0,001$  м/с,  $L_k/d = 0$  [4].

После обработки экспериментальных данных получены эмпирические зависимости для определения максимальных значений осевых и тангенциальных остаточных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_{z \max}^0 &= 5,11 \exp\left[0,092\alpha - 1,49(L_k/d)^{2,39} + \right. \\ &+ 0,03\sigma_u - 0,014Q \cdot \exp(-0,038\alpha)\left. \right] \times \\ &\times [1,43 - 0,43 \exp(-0,063V)] \times \\ &\times [1 - \exp(-0,056d)]; \quad (3) \\ \sigma_{\varphi \max}^0 &= 0,42Q^{0,34+0,002\alpha} \cdot \ln[0,03(2\alpha)^{4,4}] \times \\ &\times \exp(0,03\sigma_u - 0,47(L_k/d)^{2,25}) \times \\ &\times [1,16 - 0,16 \exp(-0,09V)] \times \end{aligned}$$

$$\times [1 - \exp(-0,056d)]. \quad (4)$$

Для удобства пользования этими формулами и более наглядного представления о влиянии того или иного фактора на величину остаточных напряжений построены номограммы [4]. Если, например, появляются рекламации на повышенную склонность изделий из калиброванной стали к износу, коррозии, растрескиванию или искривлению, то по номограммам можно быстро определить величину остаточных напряжений и оценить их возможное влияние на обнаруженные дефекты.

Таким образом, технические проблемы, вызываемые технологическими остаточными напряжениями растяжения при холодном деформировании металлоизделий, могут быть успешно решены. Остаточные напряжения можно существенно уменьшить, полностью снять или даже изменить характер их распределения в объеме заготовки только за счет рационального назначения параметров и режимов обработки основного технологического процесса охватывающего деформирования.

#### Библиографический список

1. Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки: Пер. с пол.. М.: Металлургия, 1991. 477 с.
2. Зайдес С.А. Прогрессивные методы обработки металлов давлением в машиностроении // Вестник ИрГТУ. 1997. № 1. С. 80–85.
3. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
4. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск, 1992. 200 с.

УДК 621.86

Ф. Г. Ибрагимов, А. В. Коковихин, Л. Е. Кандауров

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБЛИЦОВОЧНОЙ ПЛАНКИ ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ УДАРЕ

Для защиты станин рабочих клеток от износа, на внутренних поверхностях стоек станин предусматривают установку облицовочных планок.

В момент захвата полосы валками под действием горизонтальной составляющей усилия прокатки  $F_z$  происходит взаимодействие подушек с облицовочными планками, вызывающее появление распределенной нагрузки на поверхности планки.

Методика определения результирующих напряжений в зоне контакта поверхностей облицовочных планок и подушек станин прокатных клеток описана в работе [1]. Расчет напряжений в любой точке облицовочной планки осуществляется по формуле:

$$\sigma = -\frac{F_z}{S} - \frac{F_z X_{F_z} X}{J_z} - \frac{F_z Z_{F_z} Z}{J_x}, \quad (1)$$

Влияние ударно приложенной нагрузки сказывается двояко по сравнению со статической: с одной стороны, хрупкие и пластичные материалы различно реагируют на ударное действие нагрузок; с другой стороны, напряжения оказываются другими, чем при статических нагрузках [2]. При динамическом действии нагрузок напряжения обычно будут большими, чем при статическом действии тех же нагрузок.

Отношение напряжения  $\sigma_d$ , вызванного динамическим действием нагрузки, к напряжению  $\sigma$ , вызванному статическим действием той



же нагрузки, носит название динамического коэффициента  $K_\delta$ :

$$\frac{\sigma_\delta}{\sigma} = K_\delta. \quad (2)$$

Величина  $K_\delta$  зависит от характера динамичности нагрузки и в ряде случаев достигает весьма больших значений.

При ударе происходит очень быстрое превращение одного вида энергии в другой, кинетическая энергия ударяющего тела превращается в потенциальную энергию деформации. Выражая эту энергию в функции силы  $F_z$  или напряжений, или деформаций, мы получаем возможность вычислить эти величины.

Коэффициент динамичности рассчитывается по формуле

$$K_\delta = 1 + \sqrt{1 + \frac{T_0}{U_\delta}}, \quad (3)$$

где  $T_0$  – потери кинетической энергии при ударе;  $U_\delta$  – потенциальная энергия деформации.

$$T_0 = \frac{m}{2} (V_1^2 - V_2^2), \quad (4)$$

где  $m$  – масса ударяющего тела, кг;  $V_1, V_2$  – скорости ударяющего тела до и после удара.

Скорость  $V_2$  определяется из схемы на рис. 1.

$$V_2 = V_1 \cos \alpha. \quad (5)$$

Потенциальная энергия деформации:

$$U_\delta = \frac{1}{2} F_z \delta_\delta, \quad (6)$$

где  $\delta_\delta$  – продольная деформация м,

$$\delta_\delta = \frac{F_z}{c}, \quad (7)$$

$c$  – некоторый коэффициент пропорциональности (называемый иногда жесткостью системы); зависит от свойств материала, формы и размеров тела, вида деформации и положения ударяемого сечения.

При простом растяжении, сжатии:

$$c = EF/l,$$

где  $E$  – модуль упругости материала, Па;  $F$  – площадь поперечного сечения ударяемого тела, м<sup>2</sup>;  $l$  – толщина тела, м.

Рассчитанный таким образом коэффициент динамичности  $K_\delta$ , для прокатной клетки стана

2000 г. позволят произвести вычисление ударного напряжения с учетом динамических явлений.

Для клетки №6  $K_\delta = 57,84$ ,  $\sigma_\delta = 240,28$  МПа.

Сравнивая полученные значения  $\sigma_\delta$  с пределом упругости материала облицовочной планки (рис. 2), можем заметить, что  $\sigma_\delta$  превышает предел упругости материала рабочей планки. Так, для стали Ст 45  $\sigma_y = 220-240$  МПа, а полученные расчетные  $\sigma_\delta = 240,28$  МПа.

В связи с тем, что напряжения находятся в зоне пластической деформации, при снятии нагрузки будет накапливаться остаточная деформация.

Относительная деформация при граничном значении предела упругости

$$\sigma_y = \frac{\sigma_y}{E}, \quad (8)$$

при расчетном значении  $\sigma_\delta$

$$\varepsilon_\delta = \frac{\sigma_\delta}{E}. \quad (9)$$

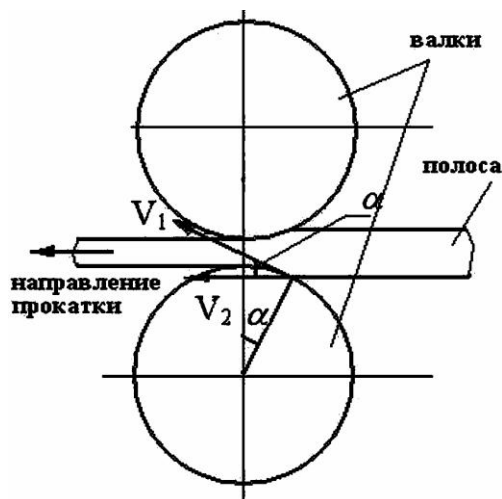


Рис. 1. Схема скоростей при ударе

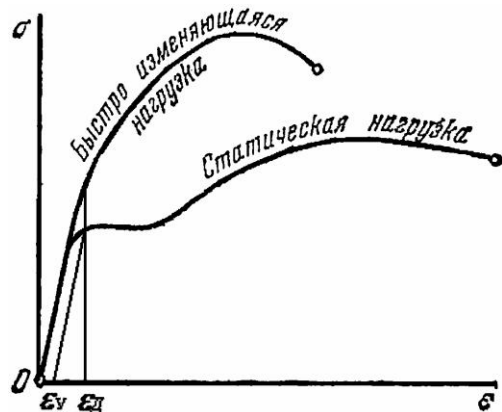


Рис. 2. Диаграмма растяжения при медленно и быстро изменяющихся силах

Получившееся значение напряжения  $\sigma_d = 240,28$  МПа откладываем по оси  $\sigma$ . Затем из точки пересечения графика «быстро изменяющейся нагрузки» опускаем на ось  $\varepsilon$  прямую и получаем значение  $\varepsilon_d$ .

Предполагаем, что при пересечении этой прямой графика «статической нагрузки» получаем точку, из которой параллельно участку упругой деформации проводим другую прямую, в результате чего получаем значение  $\varepsilon_y$ . Искомое значение относительной деформации  $\varepsilon_u$  находится как

$$\varepsilon_u = \varepsilon_d - \varepsilon_y. \quad (10)$$

Относительное укорочение или остаточная деформация

$$\Delta l = \varepsilon_u \cdot l, \quad (11)$$

Полученная остаточная деформация образуется в результате одного удара, т.е. при прокатке одной заготовки. Зная число ударов между заменами планок, можно посчитать общую остаточную деформацию  $\Delta l_{общ}$

$$\Delta l_{общ} = \Delta l \cdot n, \quad (12)$$

где  $n$  – число ударов.

Проведенные предварительные расчеты показывают, что остаточная деформация при максимальном напряжении между заменами планок достигает 3,6 мм, что соответствует производственным данным.

Следовательно, представленная модель позволяет определить величину остаточной деформации с учетом динамических явлений, возникающих при захвате полосы валками.

#### Библиографический список

1. Определение результирующих напряжений в зоне контакта поверхностей облицовочных планок и подушек валков прокатных клетей / Л.Е.Кандауров, А.В.Коковихин, Ф.Г.Ибрагимов, А.В.Веселов, И.В.Казаков, К.Г.Алешкевич // Моделирование и развитие процессов и обработки металлов давлением: Межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2006. С. 245–248.
2. Беляев Н.М. Соппротивление материалов: Учебник. М.: Наука, 1976. 608 с.

УДК 621.771

Н. Ш. Тютряков, Н. В. Оншин, Л. Е. Кандауров

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ИЗНАШИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНОСЕ

Известно, что для оценки износостойкости материалов используются показатели интенсивности изнашивания: линейная, весовая и энергетическая [1]. Однако эти показатели не связывают износ со свойствами материала и характеристиками процесса трения (нагрузкой, скоростью, температурой и пр.). Установление такой связи было бы чрезвычайно важно, так как, располагая ею, можно управлять процессом изнашивания и подбирать материалы трущихся пар по их свойствам и режимам работы.

С целью выяснения зависимости изнашивания от температуры был проведен сравнительный эксперимент по определению показателей интенсивности изнашивания для различных марок стали и чугунов. Эксперимент проводился на специально сконструированной установке для проведения испытаний материалов на изнашивание при высоких температурах [2]. Схема испытания в данной установке – «диск – колодка». В качестве истирающего диска в установке используется абразивный круг марки 63С25СМ27КБ3 диаметром 200 мм,

приводимый во вращение электродвигателем переменного тока мощностью 250 Вт с частотой вращения 1500 об./мин.

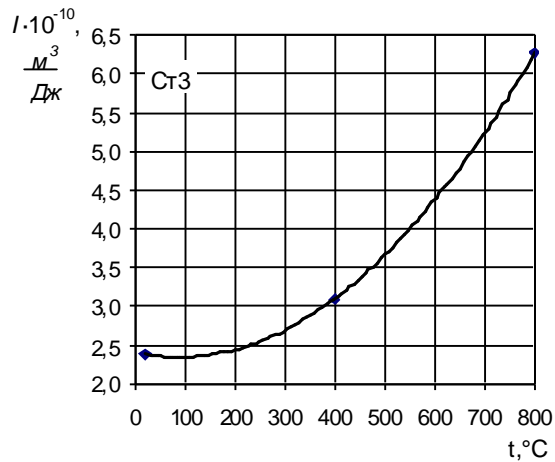
Образцы для исследования представляли собой цилиндрические стержни диаметром 14–15 мм и длиной 30 мм, закрепленные в державке массой 700 г, которая помещалась в электрическую печь для нагрева до заданной температуры.

Нагретый до заданной температуры образец с державкой опускался на вращающийся абразивный круг и истирался в течение 30 с. В процессе истирания регистрировалась потребляемая электродвигателем мощность с помощью ваттметра типа Д539. Перед каждым испытанием поверхность круга выравнивалась алмазной шарошкой.

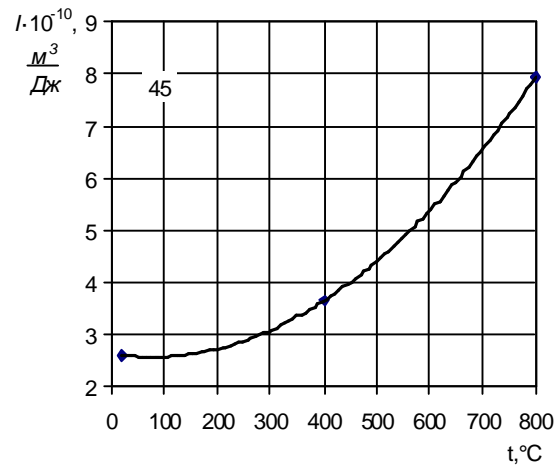
До и после истирания образцы взвешивали на электронных весах ВЛКТ-500д-М с точностью до 0,005 г. По потере массы образца определяли изношенный объем. Плотность сталей и чугунов принимали одинаковой и равной 7,85 г/см<sup>3</sup>. Мощность, затрачиваемую на истирание образца, определяли как разность полной

мощности и мощности холостого хода двигателя. Полученные результаты использовали для расчета работы сил трения при истирании и показателя энергетической интенсивности изнашивания ряда материалов. Используя эксперимен-

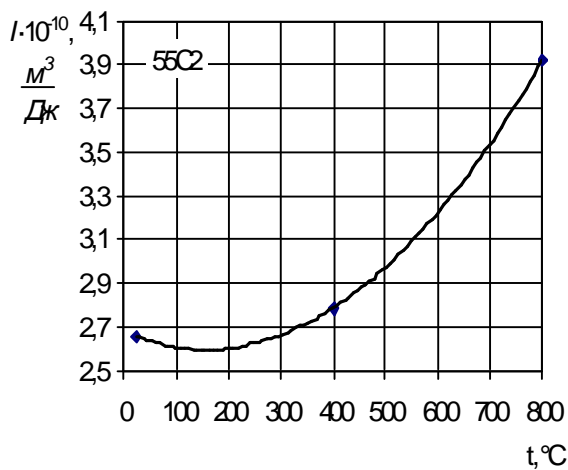
тальные данные, с помощью стандартной программы Microsoft Excel получили графики и уравнения зависимости показателя энергетической интенсивности изнашивания от температуры для исследуемых материалов (рис. 1, 2).



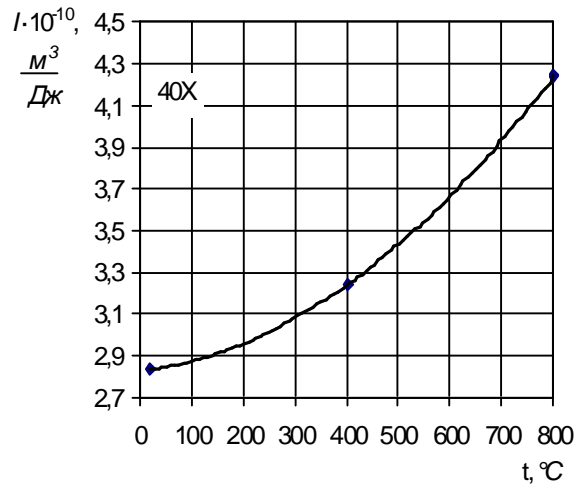
**а**  $I = 8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,0013t + 2,39$



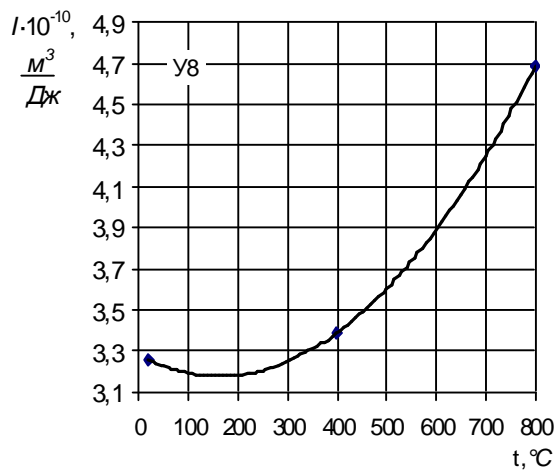
**б**  $I = 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,0016t + 2,63$



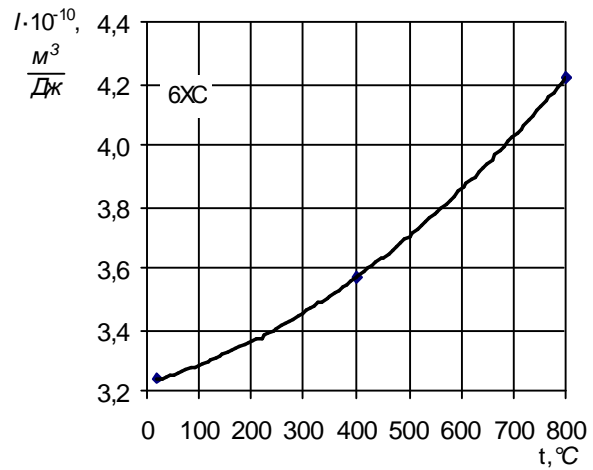
**в**  $I = 3 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,001t + 2,68$



**г**  $I = 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0003t + 2,82$



**д**  $I = 4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,0012t + 3,28$

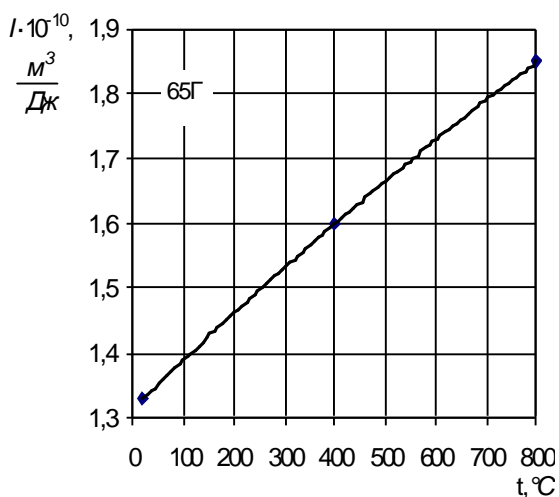


**е**  $I = 1 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0005t + 3,23$

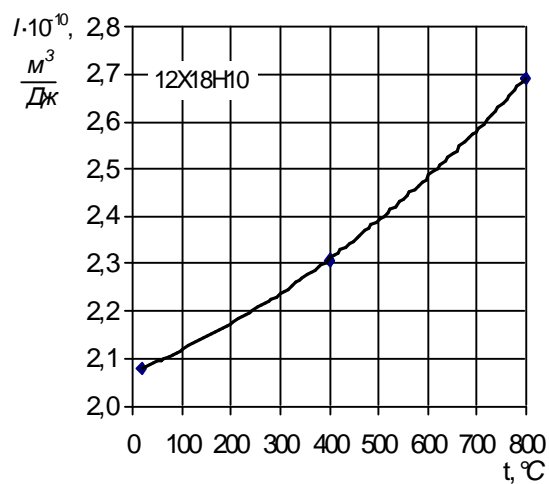
Рис. 1. Зависимости показателя энергетической интенсивности изнашивания материалов: а – Ст3; б – 45; в – 55С2; г – 40Х; д – У8; е – 6ХС

При комнатной температуре интенсивность изнашивания большинства материалов практически одинакова –  $2 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/Дж. Заметно меньшие значения показателя изнашивания наблю-

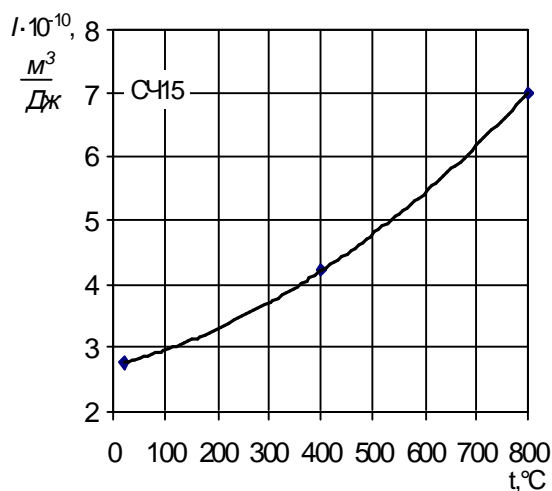
даются у стали 65Г – в два раза, 12Х18Н10Т и СОРМАЙТ – в 1,5 раза. При температуре испытаний 400°С наибольшее увеличение показателя энергетического интенсивности изнашивания



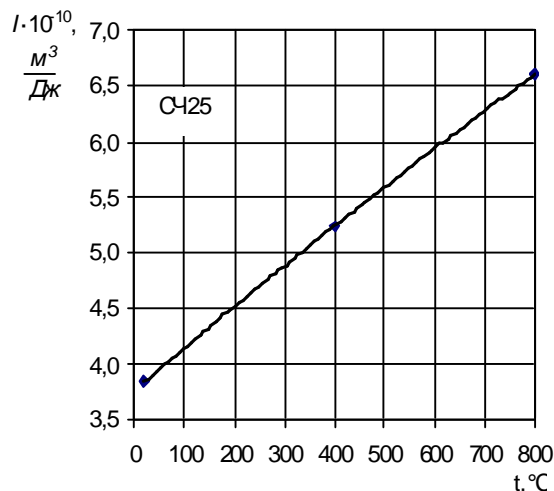
**а**  $I = -2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0021t + 1,2896$



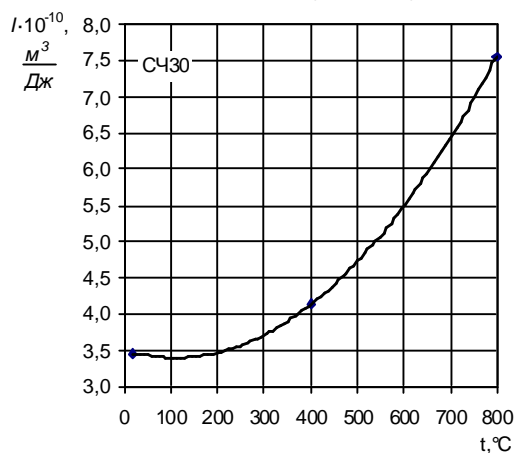
**б**  $I = 4 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 0,0004t + 2,07$



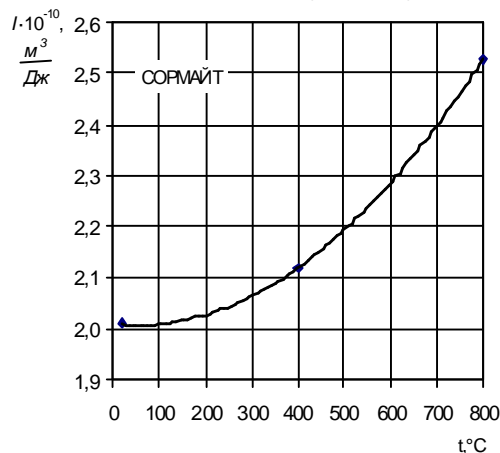
**в**  $I = 4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0021t + 2,71$



**г**  $I = 5 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0057t + 3,73$



**д**  $I = 9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,0019t + 3,49$



**е**  $I = 9 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 0,0001t + 2,01$

**Рис. 2. Зависимости показателя энергетической интенсивности изнашивания материалов:**  
**а – 65Г; б – 12Х18Н10Т; в – СЧ15; г – СЧ25; д – СЧ30; е – СОРМАЙТ**

наблюдается у стали 45 (в 2 раза) и чугуна СЧ15 (на 30%), у всех остальных материалов увеличение интенсивности изнашивания составляет порядка 10..15%. Наибольшее различие значений показателя интенсивности изнашивания проявляется при 800°C. Увеличение этого показателя в два раза выявлено у Ст3 и стали 45. Для сталей 55С2, 40Х, 6ХС и У8 рост показателя изнашивания составил 25..35% по сравнению с результатами, полученными при 400°C. Стабильно низкий рост изнашивания (порядка 10%) сохранился у 65Г, 2Х18Н10Г и СОРМАЙТа.

Таким образом, в ходе эксперимента было установлено, что с увеличением температуры изнашивание материалов увеличивается. Наибольшее (в 2,5...4 раза) изнашивание имеют рядовые марки стали, что делает их практически

неработоспособными при высоких температурах. У легированных марок сталей при 400°C изнашивание увеличивается незначительно, но при 800°C рост изнашивания составляет 25...35%. Наилучшие показатели у 65Г, 2Х18Н10Г и СОРМАЙТа. Их показатели интенсивности изнашивания имеют стабильно низкие значения вплоть до 800°C и изменяются всего на 10...15% по сравнению со значениями, полученными при комнатной температуре. Кроме того, стойкость этих материалов в 1,5 раза выше по сравнению с остальными при комнатной температуре и в 2...4 раза выше в условиях высоких температур. Полученные результаты позволяют рекомендовать эти материалы для изготовления и наплавки деталей, работающих в условиях абразивного износа при высоких температурах.

#### Библиографический список

1. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1986. 480 с.
2. Определение показателя энергетической интенсивности изнашивания материалов для валковой арматуры сортовых станков / Кандауров Л.Е., Оншин Н.В., Унру С.Я., Тютеряков Н.Ш. / ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». М., 2005. 8 с. Деп. в ВИНТИ 09.08.05, № 1132-В2005.

УДК 621.771

Н. В. Оншин, Н. Ш. Тютеряков

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГИБОВ ЛИНЕЕК ВАЛКОВОЙ АРМАТУРЫ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Валковая арматура сортовых станков предназначена для направления раската в калибры валков и удержания его в очаге деформации. Рабочие элементы арматуры скольжения (линейки) выполнены в виде пластин с выступом на торце по профилю межвалкового зазора. Они являются наиболее нагруженными деталями валковой арматуры, так как удерживают заготовку практически в очаге деформации.

Проведенные исследования по тепловому состоянию линеек валковой арматуры показали, что для их оптимального охлаждения со стороны нерабочей поверхности необходимо выполнять фаски или скругления [1] (рис. 1), а толщина линейки должна уменьшаться по мере приближения к ее носовой части. Для создания конструкции линейки с минимальной массой необходимо стремиться к тому, чтобы наибольшие нормальные напряжения во всех сечениях были одинаковы. Этот принцип позволяет использовать материал линейки с максимальной эффективностью. При этом прогибы носовых частей линеек

не должен превышать допустимых значений, поскольку это сказывается на качестве проката.

Для определения прогибов носовых частей линеек рассмотрим конструкцию линейки, изображенную на рис. 1. Сечение носовой части линейки постепенно сужается и становится тоньше. При этом радиусы скруглений уменьшаются. Размеры произвольного сечения ( $b$ ,  $h$  и  $r$ ) носовой части линейки можно определить по следующим формулам:

$$b = B_0 + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - (L - x)^2} \right); \quad (1)$$

$$h = H - \frac{(H - H_0)x}{L}; \quad (2)$$

$$r = \frac{xR_{\max}}{L}. \quad (3)$$

Момент инерции этого сечения можно определить, разбив его на несколько простых элементов (рис. 2).

Положение центра тяжести сложного сечения определяется по формуле

$$y_c = \frac{\sum S_{z_i}}{\sum F_i}, \quad (4)$$

где  $S_{z_i} = y_{c_i} \cdot F_i$  – статический момент сечения;  $y_{c_i}$  – ордината центра тяжести простого элемента;  $F_i$  – площадь элемента.

Найдем ординату центра тяжести сечения при положении оси Z в основании сечения:

$$S_{z_1} = \left( h - \frac{r}{2} \right) \cdot r \cdot (b - 2r); \quad (5)$$

$$S_{z_2} = \left( h - r + \frac{4r}{3\pi} \right) \cdot \frac{\pi \cdot r^2}{4}; \quad (6)$$

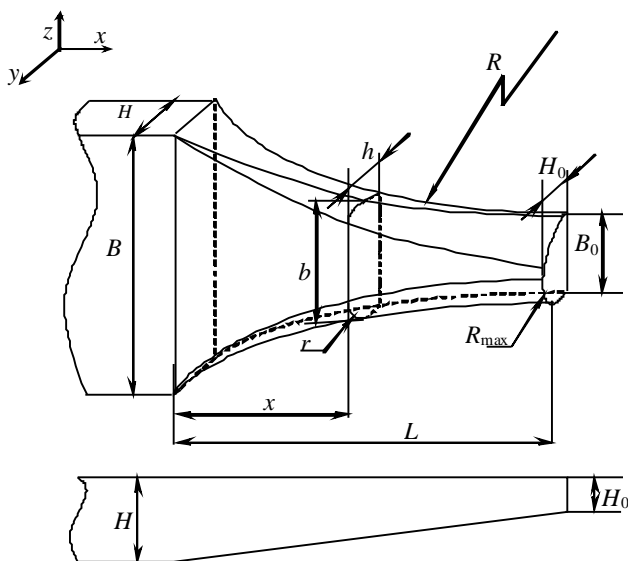


Рис. 1. Носовая часть переменного сечения линейки валковой арматуры

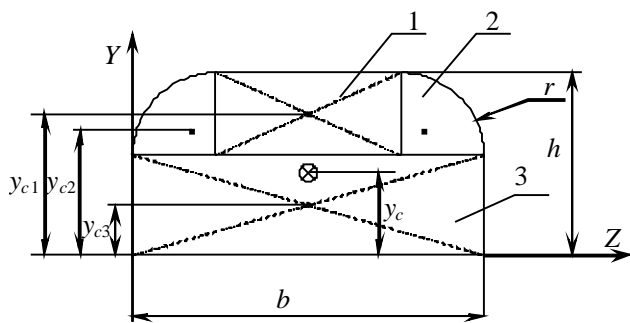


Рис. 2. Схема сечения носовой части линейки для определения центра тяжести и момента инерции

$$S_{z_3} = \frac{(h-r)^2 \cdot b}{2}. \quad (7)$$

После выполнения преобразований получим

$$y_c = \frac{r^3 \left( \pi + 2 \frac{1}{3} \right) + r^2 \cdot h(\pi - 2) + \frac{bh^2}{2}}{bh + r^2 \left( \frac{\pi}{2} - 2 \right)}. \quad (8)$$

Так как абсцисса центра тяжести сечения совпадает с осью симметрии, то

$$z_c = \frac{b}{2}.$$

Для определения момента инерции всего сечения найдем моменты инерции элементов относительно общего центра тяжести. Поскольку изгиб носовой части линейки происходит относительно оси Y, достаточно найти только момент инерции относительно этой оси. Для этого используем преобразование путем параллельного переноса осей

$$I_{y_i} = I_i + a_i^2 \cdot F_i, \quad (9)$$

где  $I_i$  – момент инерции простого элемента относительно своего центра тяжести;  $a_i$  – расстояние между осями;  $F_i$  – площадь элемента.

$$I_{y1} = \frac{(b-2r) \cdot r^3}{12} + \left( h - \frac{r}{2} - y_c \right)^2 \cdot (b-2r) \cdot r;$$

$$I_{y2} = 0.0548 \cdot r^4 + \left( \left( h - r + \frac{4r}{3\pi} \right) - y_c \right)^2 \cdot \frac{\pi r^2}{4}; \quad (10)$$

$$I_{y3} = \frac{b \cdot (h-r)^3}{12} + \left( y_c - \frac{h-r}{2} \right)^2 \cdot \frac{h-r}{2} \cdot b.$$

Момент инерции всего сечения найдем из выражения

$$I_y = I_{y1} + 2I_{y2} + I_{y3}. \quad (11)$$

Для определения прогиба линейки используем метод непосредственного интегрирования [2]. Представим ее в виде балки с защемленным концом и действующей на нее распределенной нагрузкой (рис. 3). Так как балка имеет переменное сечение, непрерывно изменяющееся по длине, для упрощения расчетов представим это изменение ступенчатым. Разобьем балку на  $n$  частей, в пределах которых размеры сечения условно не изменяются.

Рассмотрим произвольный участок длиной  $\Delta$ . Изгибающий момент на этом участке можно определить по формуле

$$M_i = -\frac{qL^2}{2} + qL(X_i + k) - \frac{q(X_i + k)^2}{2} = q(L - X_i)k - \frac{q(L - X_i)^2}{2} - \frac{qk^2}{2}. \quad (12)$$

Угол поворота поперечного сечения

$$Q_i = \int \frac{M}{EI} dk = \frac{1}{EI_{yi}} \left( -\frac{q(L - X_i)^2}{2} k + \frac{q(L - X_i)}{2} k^2 - \frac{qk^3}{6} + C \right). \quad (13)$$

Постоянную интегрирования определим из учета положения левого края участка, т.е. при  $k=0$ . Тогда получим

$$C = EI_{yi} Q_i,$$

где  $Q_i$  – угол поворота поперечного сечения в начале участка;  $E$  – модуль упругости материала;  $I_{yi}$  – момент инерции сечения на рассматриваемом участке, который определяется по приведенной выше методике.

Прогибы балки определим, повторно проинтегрировав полученное уравнение:

$$f = \iint \frac{M}{EI} dk = \frac{1}{EI_{yi}} \left( -\frac{q(L - X_i)^2}{4} k^2 + \frac{q(L - X_i)}{6} k^3 - \frac{qk^4}{24} + Ck + D \right). \quad (14)$$

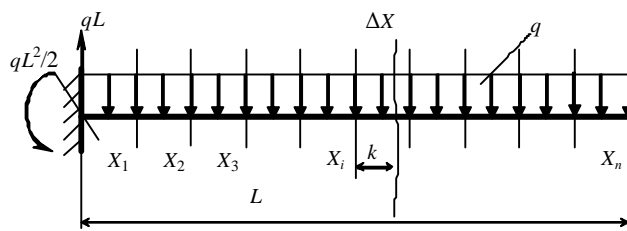


Рис. 3. Схема нагружения усеченного конца линейки

Постоянную интегрирования также определим из учета положения левого конца участка.

$$D = EI_{yi} f_i,$$

где  $f_i$  – прогиб начала участка.

Последовательно определяя прогибы и углы поворота участков, начиная с левого, определим положение конца балки. Для левого края, поскольку он жестко защемлен, начальные условия имеют вид

$$Q_0 = 0; f_0 = 0.$$

Для обеспечения прочности линейки должно соблюдаться следующее условие:

$$\sigma_{i \max} = \frac{M_i y_{ci}}{I_{yi}} < [\sigma], \quad (15)$$

где  $\sigma_{i \max}$  – максимальные нормальные напряжения в  $i$ -м сечении.

Предложенный метод позволяет на стадии проектирования создавать детали валковой арматуры повышенной долговечности, прочности и жесткости, что обеспечивает снижение их веса и экономичное использование материалов.

#### Библиографический список

1. Пат. 45100 РФ на полезную модель. Валковая арматура для бескалибровой прокатки сортовых профилей / Л.Е. Кандауров, Н.Ш. Тютяряков, И.М. Ячиков.
2. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопrotивление материалов: Учебник для техн. вузов. 5-е изд., перераб и доп. М.: Высш. шк., 1989. 624 с.

УДК 621. 771

Р. Н. Савельева, В. Б. Савельев

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НЕПРЕРЫВНЫХ ТРАВильНЫХ АГРЕГАТОВ ЛПЦ-5

Непрерывные травильные агрегаты (НТА) ЛПЦ-5 запущены в эксплуатацию в 1969 году. Их проектная мощность на момент пуска составляла

1870 тыс. т/год. В дальнейшем, за счёт интенсификации работы НТА, производство травленого металла в ЛПЦ-5 возросло к 1989 году до

2166,3 тыс. т/год. После запуска в ЛПЦ-5 двухклетового реверсивного стана потребовалось ещё большее наращивание производственных мощностей по травлению металла. В 2002 – 2004 годах проведена поэтапная реконструкция НТА-1 и НТА-2 с переводом на травление в соляной кислоте. Производительность травильных агрегатов должна была повыситься до 3200 тыс. т/год, что позволило бы полностью обеспечить подкатом станы ЛПЦ-5 и ЛПЦ-3, а также отгрузку травленного товарного проката. Однако за прошедший год линии не вышли на проектную мощность. Фактическое производство в 2005 году составило только 2789 тыс. т. В связи с этим актуальными являются предложения по увеличению производительности НТА технологическими методами: повышение массы травленных рулонов, толщины и ширины производимых полос.

В 2005 году в ОАО «ММК» уже внедрено одно такое предложение. Трехклетовой стан 1450 ЛПЦ-3 раньше был способен принимать только рулоны массой до 12,5 т. При производстве таких маловесных рулонов приходилось снижать скорость технологической части НТА, так как не уда-

валось полностью выбрать полосу из выходного петленакопителя. Для подачи рулонов массой 25 т на трехклетовой стан 1450 были реконструированы его разматыватель и загрузочное устройство. Расчетное увеличение производительности на НТА ЛПЦ-5 при переходе с 12,5-тонных рулонов на 25-тонные составило 18 365 т/год.

В данной статье приведены варианты повышения производительности НТА ЛПЦ-5 по двум направлениям:

- за счёт совершенствования технологии производства полос для агрегата горячего непрерывного цинкования (АГНЦ) ЛПЦ-3;
- путем реконструкции оборудования НТА-2 ЛПЦ-5.

В настоящее время полосы для АГНЦ производит трехклетовой стан 1450 ЛПЦ-3 из подката с НТА ЛПЦ-5. Сортамент подката приведен в табл. 1. Ниже приведены четыре варианта технологического повышения производительности НТА за счёт увеличения толщины и ширины травимых полос.

### 1 вариант

Передача части сортамента оцинковки с трехклетового стана 1450 на пятиклетовой стан 1200 ЛПЦ-3.

На пятиклетовом стане 1200 возможно прокатать полосы шириной до 1000 мм и толщиной до 0,63 мм из подката 2 мм. В настоящее время на трехклетовом стане 1450 полосы шириной 1000 мм и толщиной 0,46–0,61 мм прокатываются из подката 1,8 мм. При передаче данного сортамента оцинковки с трехклетового стана 1450 на пятиклетовой стан 1200 возможно увеличение толщины подката с 1,8 до 2,0 мм. Всего возможно передать 16351 т/год. В результате реализации этого варианта удастся повысить производительность НТА ЛПЦ-5 на 3395 т/год (табл. 2).

Таблица 1

Подкат для трехклетового стана 1450 ЛПЦ-3 ОАО «ММК»

Толщина подката, мм	Ширина подката, мм	Количество подката, т/год
1,8	1000	18025
	1030	2697
	1220	5316
	1250	74648
2	1000	2487
	1030	109
	1220	147
	1250	6675
2,2–2,3	1000	3879
	1030	111
	1220	1445
	1250	6123
2,5	1000	3041
	1030	–
	1220	817
	1250	4101
3	1000	3123
	1030	125
	1220	1631
	1250	3924
Всего	1000	30555
	1030	3024
	1220	9356
	1250	95471
	Всего	138406

Таблица 2

Увеличение производительности НТА при прокатке части полос под цинкование на пятиклетовом стане 1200

Толщина оцинковки, мм	Количество подката, т/год	Толщина подката для трехклетового стана 1450 ЛПЦ-3	Толщина подката для пятиклетового стана 1200 ЛПЦ-3	Увеличение производительности НТА ЛПЦ-5, т/год
0,46	6184	1,8	2,0	1284
0,51	7447	1,8	2,0	1546
0,56	1871	1,8	2,0	388
0,61	849	1,8	2,0	177
Всего	16351			3395



### 2 вариант

Производство подката двойной ширины.

Технология состоит из следующих операций. На стане 2500 горячей прокатки прокатываются полосы сечением 2,8–3×2040–2100 мм. На стане 2500 холодной прокатки они перекатываются на сечение 1,21–1,46×2040–2100 мм. Затем они отжигаются для уменьшения твердости перед резкой, перематываются на дрессировочном стане, распускаются на АПР-4 или 5 на полосы 1,21–1,46×1000–1030 мм и передаются на АГНЦ ЛПЦ-3. Всего необходимо 3248 т/год такого подката. В результате реализации этого варианта удастся повысить производительность НТА ЛПЦ-5 на 2023 т/год (табл. 3).

### 3 вариант

Передача части сортамента оцинковки с трехклетевого стана 1450 на четырехклетевой стан 2500 ЛПЦ-5.

На четырехклетевом стане 2500 возможно прокатать полосы шириной 1030–1250 мм и толщиной 0,45–1,5 мм. Всего возможно передать 107869 т/год. Четырехклетевой стан 2500 ЛПЦ-5 обладает большей обжимной способностью и способен производить полосы из более толстого подката. В результате реализации этого варианта удастся повысить производительность НТА ЛПЦ-5 на 17408 т/год (табл. 4).

### 4 вариант

Производство подката увеличенной ширины с дальнейшим несимметричным роспуском на две полосы на линии продольной резки (ЛПР) ЛПЦ-3. Полоса шириной 1000–1250 мм пойдет под цинкование, а полоса шириной 210–300 мм может быть передана на ОАО «МКЗ» в цех ленты холодной прокатки.

Для реализации этого варианта необходима реконструкция ЛПР, включающая:

- покупку второй режущей клетки для быстрого

Таблица 3

Увеличение производительности НТА при использовании подката двойной ширины

Толщина оцинковки, мм	Количество подката, т/год	Увеличение производительности НТА ЛПЦ-5, т/год
1,21	248	155
1,26	1543	961
1,31	279	173
1,36	277	172
1,46	901	562
всего	3248	2023

- перехода с одного типоразмера на другой;
- реконструкцию устройства для снятия рулонов с моталки и установку разделительных роликов.

В результате реализации этого варианта удастся повысить производительность НТА ЛПЦ-5 на 9713 т/год (табл. 5).

Для повышения производства травленого металла в ЛПЦ-5 на 600–800 тыс. т/год необходима реконструкция оборудования НТА-2, для доведения его до уровня более совершенного НТА-1. Минимальный перечень мероприятия по реконструкции оборудования имеет следующий вид:

- внедрение двухуровневой задачи концов полосы с установкой двух толщиномеров;

Таблица 4

Увеличение производительности НТА при прокатке части полос под цинкование на четырехклетевом стане 2500

Толщина оцинковки, мм	Количество подката, т/год	Толщина подката для трехклетевого стана 1450 ЛПЦ-3	Толщина подката для четырехклетевого стана 2500 ЛПЦ-5	Увеличение производительности НТА ЛПЦ-5, т/год
0,46–0,66	82661	1,8	2	14301
0,7–0,76	6602	2,0	2,2	934
0,81–0,84	329	2,0	2,4	86
0,86–0,96	7679	2,2–2,3	2,6	1430
1,04–1,16	4918	2,5	2,8	657
1,21–1,46	5680	3,0	3,0	0
Всего	107869			17408

Таблица 5

Увеличение производительности НТА при несимметричном роспуске подката на ЛПР

Толщина подката, мм	Ширина подката, мм	Количество подката, т/год	Увеличение производительности НТА ЛПЦ-5, т/год
1,8	1000	18025	4506
	1030	2697	674
	1220	5316	В ЛПЦ-4 невозможно прокатать полосы шириной более 1300 мм
	1250	74648	
2	1000	2487	622
	1030	109	27
	1220	147	30
	1250	6675	1335
2,2–2,3	1000	3879	970
	1030	111	28
	1220	1445	296
	1250	6123	1225
Всего		41697	9713

- установка лазерной сварочной машины;
- установка изгибо-растяжной машины;
- замена глубоких травильных ванн на плоские ванны турбулентного травления;
- установка петлевых устройств в головной и хвостовой частях агрегата;

- совершенствование АСУ ТП.

Внедрение предложенных вариантов позволяет поэтапно повысить производительность НТА ЛПЦ-5, полностью обеспечить подкатом прокатные станы ОАО «ММК» и увеличить отгрузку травленого товарного металла.

УДК 621.771

Ю. В. Жиркин, Е. И. Мироненков, Е. А. Дудоров, С. Б. Резванов

## ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ МАСЕЛ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ РАБОЧИХ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Использование пластичного смазочного материала для смазывания подшипников качения рабочих валков чистой группы клетей стана 2000 горячей прокатки приводит к повышенному расходу смазочного материала и невысокой стойкости четырехрядных подшипников качения, средний ресурс которых составляет  $\approx 3000 \dots 3500$  ч.

При переходе на системы смазывания масло-воздух преимущества очевидны: во-первых, снижение расхода смазочных материалов, во-вторых, возможность реализации режима жидкостной смазки.

Возможность использования в данных системах минеральных масел класса вязкости от 100 до 680 требует обоснования применения определенной марки минерального масла.

Основным критерием такого обоснования является условие реализации в подшипнике качения эластогидродинамической смазки. Известно, что это возможно при коэффициенте

толщины масляной плёнки  $\lambda > 2,5$ . То есть толщина масляной плёнки  $h_0$  должна быть больше  $R_{анр} = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$ , приведенной величины шероховатости контактирующих тел 1 и 2.

Толщина масляной плёнки зависит от вязкости смазочного материала, на величину которой оказывает существенное влияние температура, и наоборот.

Толщина масляной плёнки  $h_0$  определяется из зависимости [3]

$$h_0 = 3,17 \cdot (v_t \cdot U_\Sigma)^{0,75} \cdot \alpha^{0,6} \cdot \rho_{np}^{0,4} \cdot q_n^{-0,15}, \quad (1)$$

где  $h_0$  – толщина смазочного слоя в точке, в которой градиент давления равен нулю, м;  $v_t$  – кинематическая вязкость масла при °С;  $U_\Sigma$  – суммарная скорость качения в контакте, м/с;  $\alpha$  – пьезокоэффициент вязкости смазочного материала, МПа<sup>-1</sup>;  $\rho_{np}$  – приведенный радиус кривизны поверхностей трения, м;  $q_n$  – нагрузка на единицу длины линии контакта, Н/м;

Изучение вязкости минерального масла на температурный режим подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станом осуществлялось на специально разработанной для этой цели экспериментальной установке, где необходимо было создать условия нагружения, подобные нагружению подшипниковых узлов рабочих валков стана 2000 г.п.

Параметры нагружения экспериментальной установки определялись в соответствии с теорией подобия [1, 2].

Параметры нагружения подшипников качения рабочих валков приведены в **таблице**.

Идентичность условий нагружения соблюдается при следующем соотношении масштабных коэффициентов для зависимости (1):

**Параметры нагружения подшипников качения рабочих валков чистой группы клетей стана 2000 г.п.**

Параметр	Номер клетки						
	7	8	9	10	11	12	13
Нагрузка на подшипник Р, кН	480...640				820...1620		
Угловая скорость $\omega$ , с <sup>-1</sup>	2...9	2,5...10	5...15	7...20	10...25	14...28	18...45
Средняя угловая скорость $\omega_{ср}$ , с <sup>-1</sup>	5,5 (31)*	6,0 (34)*	10 (57)*	13 (74)*	17 (97)*	21 (120)*	31 (176)*
Угол действия нагрузки, $\alpha$ , °	10...20				3...8		

\* Угловая скорость на экспериментальной установке.

$$m_h = (m_\mu \cdot m_U)^{0,75} \cdot m_\alpha^{0,6} \cdot m_\rho^{0,4} \cdot m_q^{-0,15}.$$

Для экспериментальной установки

$$m_\rho = 2,22; m_q = 8,42.$$

Задаваясь условием  $m_w = 1; m_h = 1; m_U = 1$ , найдём коэффициент нагрузки  $m_P$  из зависимости [4]

$$P = \frac{q_n \cdot z \cdot i \cdot l}{4,6},$$

где  $q_n$  – нагрузка на единицу длины линии контакта, Н/м;  $z$  – число роликов;  $i$  – количество рядов роликов;  $l$  – длина ролика, м.

$$m_P = m_q \cdot m_z \cdot m_i \cdot m_l,$$

$$m_P = 8,42 \cdot 2,53 \cdot 2 \cdot 3 = 127,8.$$

Тогда нагрузка на подшипник качения в экспериментальной установке

$$P^M = \frac{P^H}{m_P} = \frac{820}{127,8} \approx 6,4 \text{ кН}.$$

Но, учитывая незначительное влияние нагрузки на толщину масляной пленки  $h_0 \approx q^{-0,15}$ , ис-

следования проводили под нагрузкой  $P^M = 5 \text{ кН}$ . В этом случае отклонение от толщины смазочной пленки составит 4%.

Для зависимости [3]

$$U_\Sigma = \frac{d_0 \omega}{2} (1 - \gamma^2)$$

при  $m_U = 1$  масштабный коэффициент угловых скоростей

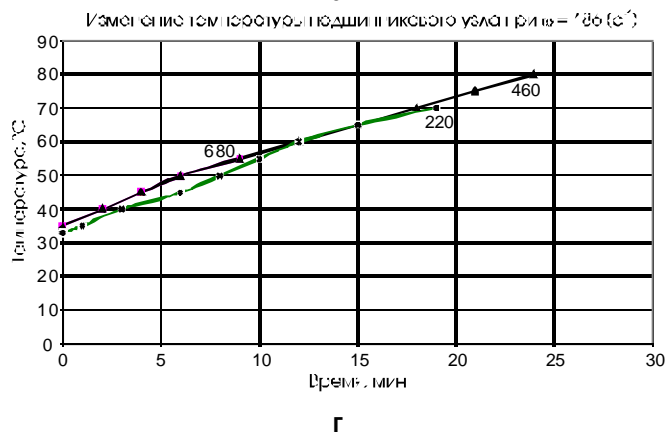
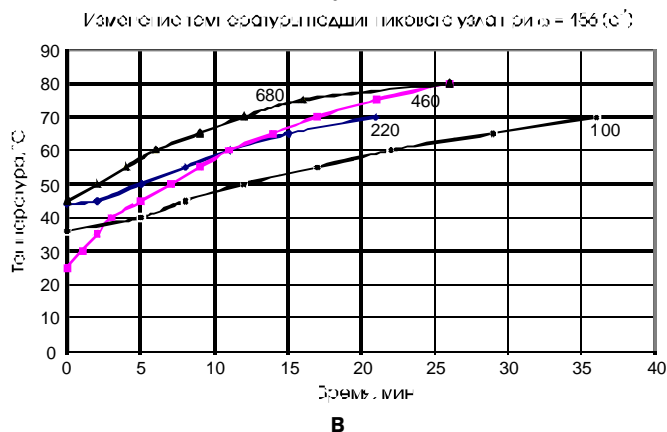
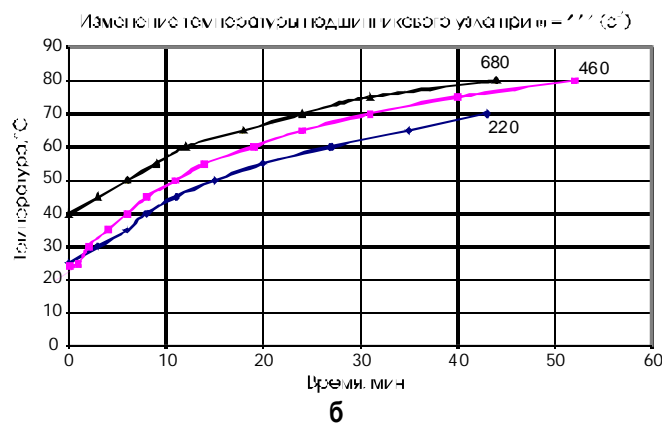
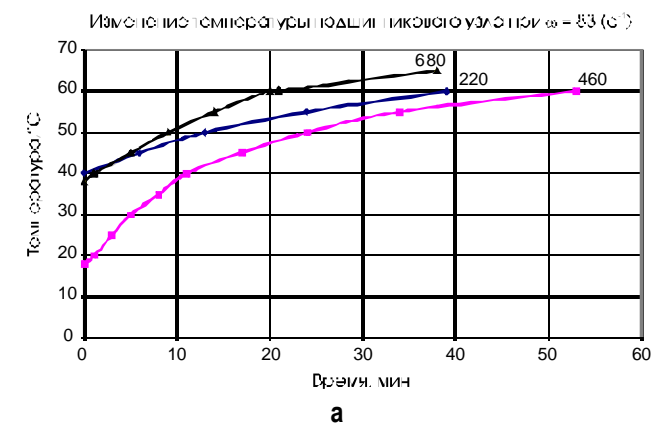
$$m_\omega = 0,176.$$

Тогда угловая скорость на установке

$$\omega_M = 5,7 \cdot \omega_H.$$

Так как на экспериментальной установке угловые скорости заданы соответствующими передаточными числами и равны  $\omega = 58, 83, 111, 156, 186, 264 \text{ с}^{-1}$ , то получаемые экспериментальные данные будут соответствовать

$\omega = 58 \text{ с}^{-1}$	для	9-й клетки,
$\omega = 83 \text{ с}^{-1}$	—	10-й клетки,
$\omega = 83-111 \text{ с}^{-1}$	—	11-й клетки,
$\omega = 111-156 \text{ с}^{-1}$	—	12-й клетки,
$\omega = 186-264 \text{ с}^{-1}$	—	13-й клетки.



Изменение температуры подшипникового узла с течением времени

Для исследования были выбраны следующие марки масел:

Марка масла	Класс вязкости
И-100Р	100
Mobil Gear 630	220
Mobil Vacuoline 146	460
Mobil Gear 636	680

При проведении экспериментов с использованием экспериментальной установки в подшипник качения заливался смазочный материал на 1/3 диаметра ролика. При запуске установки, используя тензометрическое устройство, фиксировалось усилие от момента кручения наружно-

го кольца подшипника качения, температура разогрева подшипникового узла с помощью ртутного термометра и время разогрева до определенной температуры через каждые 5°C.

Полученные зависимости температуры подшипникового узла и для различной вязкости смазочного материала с течением времени для различных условий нагружения приведены на **рисунке**.

Аппроксимация полученных экспериментальных данных позволит находить температуру подшипникового узла и соответствующую ей вязкость для различных марок минеральных масел.

#### Библиографический список

1. Веников В.А., Веников Г.А. Теория подобия и моделирования. М.: Высш. шк., 1984. 439 с.
2. Седов Л.М. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 432 с.
3. Коднир Д.С., Жильников Е.П., Байбородов Ю.И. Эластогидродинамический расчет деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 166 с.
4. Перель Л.Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.

УДК 669.1.002.5 – 192

В. П. Анцупов, С. Н. Калиниченко, А. В. Анцупов, В. И. Завьялов, А. А. Подосян

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ РОЛИКОВ ПЕРВОЙ СЕКЦИИ МНЛЗ

В работе представлены результаты теоретических исследований, направленных на увеличение срока службы подшипниковых узлов первой секции МНЛЗ, выбором рациональных параметров шероховатости поверхности цапфы оси ролика под уплотнением [1], так как износ уплотнения в первую очередь определяет ресурс подшипникового узла.

Текущее значение линейного износа уплотнения  $\Delta h_y(t)$  определяли, используя энергетический подход В.Д. Кузнецова [2], на основе рассчитанной экспериментально-аналитически  $I_w$  энергетической интенсивности изнашивания поверхности уплотнения в условиях фрикционного взаимодействия с цапфой оси ролика:

$$\Delta h_y(t) = I_w \cdot F_{TP} \cdot V_{ск} \cdot t \cdot (A_a)^{-1}. \quad (1)$$

Введя в основное уравнение изнашивания (1) значение допустимого износа уплотнения  $[\Delta h_y] = 0,95 \cdot \Delta N$  ( $\Delta N$  – натяг, определяемый посадкой уплотнения на ось), получим выражение для оценки ресурса работы уплотнения:

$$t = T_\gamma = [\Delta h_y] \cdot (I_w \cdot F_{TP} \cdot V_{ск})^{-1}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2):  $t$  – текущее время работы подшипникового узла, с;  $V_{ск} = 0,167 \cdot \pi \cdot d_y \cdot n \cdot 10^{-4}$  – окружная скорость скольжения уплотнения относительно цапфы оси ролика, м/с;  $d_y$  – диаметр цапфы оси (**рис. 1**), мм;  $n$  – частота вращения ролика, об./мин;  $F_{TP}$  – сила трения в контакте цапфы с уплотнением, Н.

$$F_{TP} = p_c \cdot f \cdot A_a, \quad (3)$$

где  $A_a = \pi \cdot d_y \cdot B_y$  – номинальная площадь контакта, мм<sup>2</sup>;  $B_y$  – ширина уплотнения (см. **рис. 1**), мм;  $p_c$  – контурное давление в контакте [3], МПа.

$$p_c = \left| \frac{\Delta N \cdot E_y}{\left( \frac{1+k^2}{1-k^2} + \mu_y \right) \cdot d_y \cdot 1000} \right|. \quad (4)$$

Здесь  $E_y$  – модуль упругости материала уплотнения, МПа;  $\mu_y$  – коэффициент Пуассона материала уплотнения;  $k = D_y \cdot d_y^{-1}$ ;  $D_y$  – внешний диаметр уплотнения (см. **рис. 1**), мм.

Для оценки  $f$  в условии (3) использована методика [3], где его значение определяется в зависимости от вида контакта.

Вид контакта в паре уплотнение – цапфа оси ролика в зависимости от контурного давления  $p_c$  определяется по условиям:

$$\text{Вид контакта} = \begin{cases} \text{упругий ненасыщенный,} & \text{если } 0 < p_c \leq p_{c1}; \\ \text{упругопластический,} & \text{если } p_{c1} < p_c \leq p_{c2}; \\ \text{пластический ненасыщенный,} & \text{если } p_{c2} < p_c \leq p_{c3}; \\ \text{пластический насыщенный,} & \text{если } p_{c4} < p_c \leq p_{c5}, \end{cases}$$

а границы видов контакта, МПа:

$$p_{c1} = \frac{2,4^{\frac{2v+1}{v}} \cdot v \cdot (v-1) \cdot k_1 \cdot HB_y^{2v+1} \cdot (1-\mu_y^2)^{2v}}{5 \cdot \Delta^v \cdot E_y^{2v}}; \quad (5)$$

$$p_{c2} = \frac{5,4^v \cdot HB_y^{2v+1} \cdot (1-\mu_y^2)^{2v}}{2 \cdot \Delta^v \cdot E_y^{2v}}; \quad (6)$$

$$p_{c3} = \frac{0,5 \cdot HB_y}{\left(b^v \cdot v\right)^{\frac{1}{v-1}}}; \quad (7)$$

$$p_{c4} = 0,32 \cdot \alpha \cdot HB_y^2. \quad (8)$$

В приведенных выше выражениях:  $HB_y$  – твердость материала уплотнения, МПа;  $\Delta$  – ком-

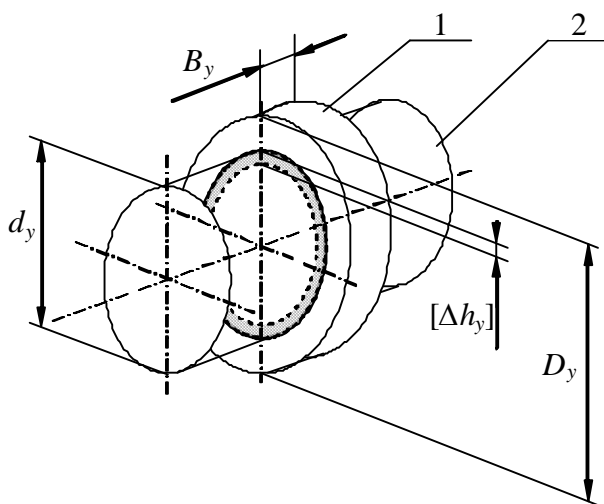


Рис. 1. Схема посадки уплотнения на ось ролика МНЛЗ:  
1 – уплотнение; 2 – ось ролика МНЛЗ

плексный показатель шероховатости поверхности оси ролика;  $v$  – параметр опорной кривой поверхности оси ролика;  $k_1$  – постоянная интегрирования, зависящая от  $v$ , согласно [3];  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий напряженное и кинематическое состояние в зоне контакта, при упругом контакте  $\alpha=0,5$ , при пластическом  $\alpha=1$ .

Значение коэффициентов трения согласно [3] на контакте уплотнения с цапфой оси ролика определяется из выражений:

– при упругом ненасыщенном контакте

$$f = \left( \frac{2,4 \cdot \tau_0 \cdot (1-\mu_y^2)^{\frac{4}{5}}}{p_c^{\frac{1}{5}} \cdot \Delta^{\frac{2}{5}} \cdot E_y^{\frac{4}{5}}} \right) + \beta + 0,24 \cdot \alpha_{эф} \cdot p_c^{\frac{1}{5}} \cdot \Delta^{\frac{2}{5}} \cdot \left( \frac{1-\mu_y^2}{E_y} \right)^{\frac{1}{5}}; \quad (9)$$

– при упругопластическом контакте

$$f = \frac{\tau_0}{HB_y} + \beta + 0,9 \cdot \left( \frac{(1-\mu_y^2) \cdot HB_y}{E_y} \right)^2; \quad (10)$$

– при пластическом ненасыщенном контакте

$$f = \frac{\tau_0}{HB_y} + \beta + 0,5 \cdot \Delta^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{p_c}{HB_y} \right)^{\frac{1}{4}}; \quad (11)$$

– при пластическом насыщенном контакте

$$f = \frac{\tau_0}{HB_y} + \beta + 0,9 \cdot \Delta^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{p_c}{HB_y} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (12)$$

где  $\tau_0$  – касательные напряжения в контакте, МПа;  $\beta$  – коэффициент влияния нормального давления на межмолекулярное сцепление;  $\alpha_{эф} = 2,5 \cdot \alpha_1$  – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении;  $\alpha_1$  – коэффициент гистерезисных потерь при одноосном растяжении (сжатии).

Энергетическую интенсивность изнашивания  $I_w$  для пары трения уплотнение – цапфа оси ролика, входящую в выражение (1), определяем согласно стандартным требованиям рекомендаций «Обеспечение износостойкости изделий». В качестве исходных данных для определения  $I_w$  используем значения  $i$ -й наработки по скорости изнашивания уплотнения  $\gamma_{vi}$  и мощности сил трения в контакте  $N_{TPi}$ . Из  $t$  вычислений соотношений скорости  $\gamma_{vi}$  и  $N_{TPi}$  оцениваем статистические характеристики энергетической интенсивности изнашивания: среднее значение  $\bar{I}_w$ , дисперсию  $S^2$  и коэффициент вариации  $V$ .

$$\bar{I}_w = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m (\gamma_{Vi} \cdot N_{TPi}^{-1}); \quad (13)$$

$$S^2 = \frac{m}{m-1} \cdot \left( \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m (I_w^2 - \bar{I}_w^2) \right); \quad (14)$$

$$V = \sqrt{S^2} \cdot \bar{I}_w^{-1}. \quad (15)$$

Для пары уплотнение – цапфа оси ролика вычисляем допустимые пределы  $I_{wh}$  и  $I_{wb}$ , определяющие интервал, в который с вероятностью  $\gamma$  должна попасть основная доля измерений, не меньшая заданного предела  $P$ . Принимая нормальный закон распределения величины  $I_w$  и задаваясь  $\gamma=0,99$ ,  $P=0,9$ , находим минимальное число испытаний  $m=60$ . Допустимые пределы величины  $I_w$  определяем по формулам:

$$I_{wh} = \bar{I}_w - t1 \cdot S; \quad (16)$$

$$I_{wb} = \bar{I}_w + t1 \cdot S, \quad (17)$$

где  $t1 = t_{\infty}^P \cdot \left( 1 + \frac{Z_{\gamma}}{\sqrt{12 \cdot m}} + \frac{5 \cdot Z_{\gamma}^2 + 10}{12 \cdot m} \right)$ .

Здесь для заданных значений  $\gamma$  и  $P$  коэффициент вероятностного распределения  $t_{\infty}^P = 1,65$  и квантиль  $Z_{\gamma} = 2,33$ .

В результате промышленного эксперимента, проведенного в «ЦРМО-3», было найдено:  $\bar{I}_w = 2,73 \cdot 10^4$  мм<sup>3</sup>/Дж;  $S = 3,62 \cdot 10^5$ ;  $V = 0,132$ ;

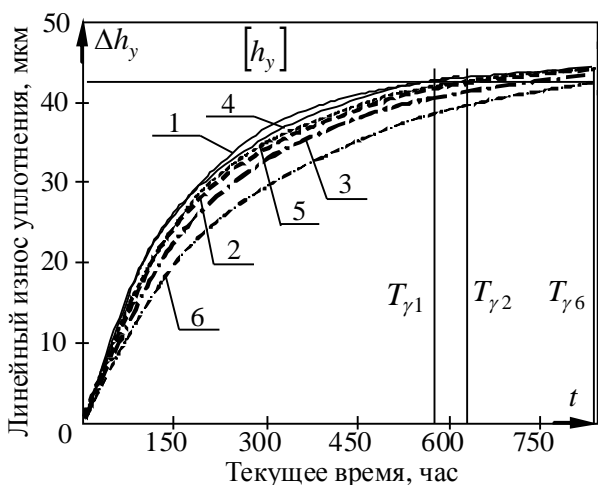


Рис. 2. Зависимости износа уплотнения от времени при различном качестве поверхности оси ролика МНЛЗ:

1 –  $\Delta=0,35$ ,  $v=1,95$ ; 2 –  $\Delta=0,15$ ,  $v=1,95$ ;

3 –  $\Delta=0,07$ ,  $v=1,95$ ; 4 –  $\Delta=0,1$ ,  $v=1,95$ ;

5 –  $\Delta=0,1$ ,  $v=0,92$ ; 6 –  $\Delta=0,1$ ,  $v=0,65$

$$I_{wh} = 2 \cdot 10^4; I_{wb} = 3,36 \cdot 10^4.$$

На рис. 2 представлены зависимости линейного износа от параметров шероховатости  $\Delta$  и  $v$ . Диапазон изменения этих характеристик выбран согласно рекомендаций [4] и может быть реально обеспечен практически реализуемыми режимами метода плакирования гибким инструментом. Пересечения кривых 1–6 с линией допустимого износа  $[\Delta h_y]$  определяют значение  $\gamma$  – процентного ресурса уплотнения  $T_{\gamma j} = T_{90j}$  при различном качестве поверхности цапфы оси ролика МНЛЗ ( $j$  – номер режима ПГИ).

Очевидно, что уменьшение  $\Delta$  при  $v = \text{const}$  (кривые 1, 2 и 3), а также  $v$  при  $\Delta = \text{const}$  (кривые 4, 5 и 6) в результате обработки приводит к увеличению ресурса уплотнения.

Физический смысл этого явления состоит в том, что происходит увеличение фактической площади касания (внутри контурной площади) уплотнения и цапфы оси ролика МНЛЗ, что при заданной внешней нагрузке, обусловленной посадкой уплотнения на ось, согласно [5], приводит к уменьшению фактического давления  $p_r$  в контакте. Согласно условиям (6) и (11) это приводит к уменьшению  $f = f(\Delta, v)$  и увеличению давления  $p_{c2}$  как границы перехода ННПК в УПК, где коэффициент трения минимален, поверхности контакта приработаны и скорость изнашивания минимальна. Таким образом, целью обработки поверхности оси ролика является увеличение  $p_{c2}$  до значений, при которых значение контурного давления  $p_c = f(\Delta, v)$ , определяемое заданным натягом  $\Delta N$ , окажется в области УПК с минимальными  $f$  и объемной скоростью изнашивания  $\gamma v$ .

На рис. 3 показано «движение» границы  $p_{c2}$ , разделяющей УПК и ННПК (кривые 1, 2 и 3), с течением времени эксплуатации при износе уп-

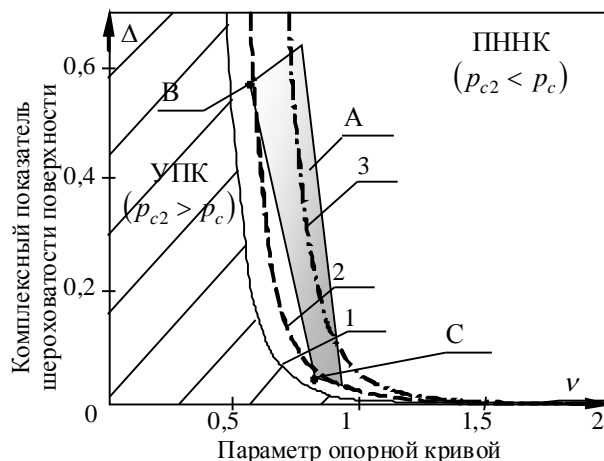


Рис. 3. Зоны реализации ПНПК и УПК:

1 –  $p_{c2}=0,32$  МПа; 2 –  $p_{c2}=0,16$  МПа; 3 –  $p_{c2}=0,01$  МПа

лотнения, снижении натяга и контурного давления  $p_c$ , а также область (А) возможных сочетаний  $\Delta$  и  $\nu$ , которые может обеспечить метод плакирования гибким инструментом (ПГИ). Кривые 1 и 3 соответствуют начальному и конечному (предельному) значениям контурного давления  $p_c$  и натяга (предельные значения определяют время замены уплотнения).

Из рис. 3 видно, что в начале эксплуатации (кривая 1) УПК для любого из сочетаний  $\Delta$  и  $\nu$  не обеспечен. При износе уплотнения и «перемещении» кривой  $p_{c2} = \text{const}$  навстречу области (А) точки первоначального их касания (точка В и(или) точка С) определяют необходимые значения  $\Delta$  и  $\nu$ , которые следует получить в первую очередь при щеточной обработке и, таким образом, обеспечить благоприятный режим эксплуатации в условиях УПК в течение времени дальнейшей работы.

Точкам В и С соответствуют следующие сочетания:  $\Delta_B = 0,57$ ,  $\nu_B = 0,65$ ;  $\Delta_C = 0,05$ ,  $\nu_C = 0,92$ .

Расчет по программе [4] на ЭВМ показывает, что кривая  $p_{c2} = \text{const}$  касается области (А) первоначально в точке С ( $\Delta_C = 0,05$ ,  $\nu_C = 0,92$ ). Этому сочетанию соответствуют следующие режимы обработки ПГИ: радиус инструмента  $R_{и1} = 140$  мм; длина гибких элементов  $l = 60$  мм; диаметр ворсинки  $d_6 = 0,25$  мм; плотность упаковки ворса  $k_n = 0,13-0,20$ ; окружная скорость инструмента  $V_{и1} = 25$  м/с; сближение оси щетки с поверхностью (натяг)  $N_{и1} = 1,5-2$  мм.

Рациональные режимы рекомендованы к применению в ЦРМО-3 для обработки поверхностей цапф осей роликов первых секций МНЛЗ № 2, 3. Их применение позволило увеличить ресурс уплотнений в  $1,09 \div 1,46$  раза, что подтверждено актом промышленных испытаний.

#### Библиографический список

1. Расчетная методика повышения долговечности подшипникового узла / Анцупов В.П., Калинин С.Н., Анцупов А.В., Завьялов В.И., Подосян А.А. // Материалы 64 НТК по итогам науч.-исслед. работ за 2004–2005 годы / Под ред. Г.С. Гуна. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2005.
2. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Томск: Политиздат, 1947. Т. 4. 542 с.
3. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984.
4. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 242 с.
5. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 728 с.

УДК 669.1.002.5-192

В. П. Анцупов, О. В. Семенова, А. В. Анцупов, А. С. Быков, А. В. Артемьев

## ТРИБОДИАГНОСТИКА СЕРИЙНОГО ВОЛОЧИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА И ОЦЕНКА РЕСУРСА ЕГО РАБОТЫ

Трибодиагностика элемента любого трибосопряжения предполагает ранжирование его в «классификации изделий и материалов по износостойкости» и установление его принадлежности к тому или иному классу и разряду [1, 2].

Класс и разряд износостойкости определяют по безразмерному показателю износостойкости – величины  $I$ , обратной линейной интенсивности изнашивания ( $I=1/I_h$ ).

Интегральная линейная интенсивность изнашивания  $I_h$  может быть определена согласно известной расчетной методике оценки изнашивания поверхностей трения деталей машин И.В. Крагельского [3], однако допущения, заложенные в основу расчета, не позволяют использовать её для описания механизма изнашивания волочильного инструмента в связи с тем, что

изнашивающее тело не является твердым, а пластически деформируется. Тем не менее, величину  $I_h$  согласно [3], можно определить с помощью интегральной энергетической интенсивности изнашивания поверхности волокна в виде:

$$I_h = I_{\omega} \cdot f \int_0^l \sigma_z dz, \quad (1)$$

а износостойкость поверхности волокна может быть найдена как:

$$I = A_a / I_{\omega} \cdot F_{mp} = \left( f \cdot I_{\omega} \int_0^l \sigma_z dz \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $A_a$  – номинальная площадь контакта проволоки с волокой в очаге деформации;  $F_{тр}$  – полная сила трения скольжения, действующая со стороны проволоки на поверхность волоки в очаге деформации;  $\tau_z$ ,  $\sigma_z$  – касательные и нормальные контактные напряжения в очаге деформации, определяемые при решении задачи по оценке напряженного состояния заготовки при расчете мощности сил трения скольжения при волочении [4];  $I_\omega = 3,5 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м – интегральная энергетическая интенсивность изнашивания рабочей поверхности волоки [4].

Согласно той же «классификации изделий и материалов по износостойкости», величина  $I$  строго однозначно зависит от условий работы изделия: значений скорости скольжения  $V_{ск}$  и среднего контактного давления  $q$ , которые наряду с  $I$  обязательно указываются в нормативных таблицах. В связи с этим при волочении определенного типоразмера проволоки в каждом переходе значение износостойкости  $I$  волоки будет зависеть от силовых и скоростных условий.

Ниже, в **таблице**, представлены результаты расчета изменения износостойкости стандартного волочильного инструмента по переходам типовой технологии одного из маршрутов волочения.

Значения средних по очагу деформации нормальных контактных давлений  $q$  определяли при решении задачи о напряженном состоянии [4], среднюю скорость скольжения  $V_{ск}$  в каждом переходе из условия постоянства секундных объемов. Значения коэффициента трения по переходу

дам маршрута волочения назначали согласно [5] в диапазоне 0,3...0,04.

Анализ данных, представленных в **таблице**, показывает, что:

- уровень значений износостойкости стандартного твердосплавного (ВК 6) волочильного инструмента находится в диапазоне  $I = 9,1 \cdot 10^9 - 5,6 \cdot 10^{10}$  и на порядок изменяется от первого перехода к последнему; соответственно класс и разряд износостойкости изменяются в пределах  $KI/p = 10/1 - 10/5$ ;
- приведенные значения собственно износостойкости, классов и разрядов точно совпадают с уровнем этих характеристик, найденных другими авторами [6] при исследовании изделий из твердых сплавов в других трибо-системах. Так, например, износостойкость измерительного калибра – скобы с наконечником из сплава ВК составляет  $I = 1,4 \cdot 10^{10}$  ( $KI/p = 10/1$ ) при среднем контактном давлении  $q = 40$  МПа и скорости скольжения  $V_{ск} = 0,5 - 1,0$  м/с;
- совпадение рассчитанных показателей износостойкости с измеренными, приведенными в рекомендациях [6], говорит о высокой надежности методики их определения с помощью энергетической интенсивности изнашивания  $I_\omega$ . Уровень надежности составляет  $\gamma = 0,99$ , доверительная вероятность  $P = 0,9$ .

Однако достаточно большой разброс как показателей линейной интенсивности изнашивания  $I_h = 9,0 \cdot 10^{-11} - 1,1 \cdot 10^{-10}$ , так и значений износостойкости  $I = 9,1 \cdot 10^9 - 5,6 \cdot 10^{10}$  из-за большого диапазона изменения силовых  $q = 50,57 - 316,44$  МПа и скоростных  $V_{ск} = 1 - 8$  м/с условий фрикционного взаимодействия не позволяет использовать данные линейные характеристики для однозначной оценки износостойкости волочильного инструмента из одного и того же материала с одинаковыми выходными параметрами и оценки ресурса его работы.

С этой целью, на наш взгляд, однозначно износостойкость рабочей поверхности волочильного инструмента можно определить с помощью единого показателя – «энергетической» износостойкости, который по определению В.Д. Кузнецова является обратной величиной энергетической интенсивности изнашивания:  $I_\omega = 1/I_\omega$  и не зависит, в отличие от  $I_h$ , от изменения энергосиловых и скоростных условий волочения.

Величина  $I_\omega = 2,86 \cdot 10^9$  Н·м/мм<sup>3</sup> с упомянутыми вероятностными характеристиками  $\gamma = 0,99$  и  $P = 0,9$  является, на наш взгляд, универсальной, единой характеристикой износостойкости стандартного волочильного инструмента для любых

**Изменение износостойкости стандартного волочильного инструмента**

Номер перехода	Условия волочения		Интегральная линейная интенсивность изнашивания $I_h$	Износостойкость $I$	Класс и разряд износостойкости $Ku/p$
	Номинальное давление $q$ , Н/мм <sup>2</sup>	Скорость скольжения $V_{ск}$ , м/с			
1	249,99	1,08	$8,7 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	10/1
2	316,44	1,33	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$9,1 \cdot 10^9$	10/5
3	255,82	1,65	$9,0 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{10}$	10/1
4	165,06	2,00	$5,8 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^{10}$	10/5
5	110,50	2,43	$3,9 \cdot 10^{-11}$	$2,6 \cdot 10^{10}$	10/4
6	80,26	2,95	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{10}$	10/4
7	58,31	3,60	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{10}$	10/4
8	84,35	4,38	$2,9 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{10}$	10/3
9	73,99	5,417	$2,6 \cdot 10^{-11}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	10/5
10	97,71	6,30	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \cdot 10^{10}$	10/3
11	57,38	7,14	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{10}$	10/4
12	50,57	7,56	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$5,6 \cdot 10^{10}$	10/4
13	59,74	8,33	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{10}$	10/4



силовых и скоростных условий его работы во всех переходах. По физическому смыслу «энергетическая» износостойкость определяет величину работы сил трения в сопряжении (очаге деформации), вызывающей потерю единицы изношенного объема поверхности волоки.

Эта характеристика наряду с  $I_{\omega}$ ,  $I$ ,  $KI/p$  является показателем качества (2-го уровня) и может быть использована для сравнительной оценки износостойкости волочильного инструмента, независимо от условий его эксплуатации.

Кроме того, рассчитанная новая характеристика – энергетическая интенсивность изнашивания поверхности стандартного волочильного инструмента позволяет оценить технический ресурс ( $t = T_{\gamma}$ ) его работы (время непрерывной эксплуатации от установки до перешлифовки на новый размер).

Гамма-процентный ресурс  $T_{\gamma}$  можно определить из основного уравнения изнашивания [4],

задаваясь величиной предельного линейного износа волоки  $\Delta d(t) = [\Delta d]$ :

$$t = T_{\gamma} = \frac{([\Delta d]^2 + [\Delta d] \cdot (d_0 + d_1)) \cdot \pi \cdot l}{4 \cdot I_{\omega} \cdot N_{mp}}. \quad (3)$$

В этом уравнении параметры очага деформации  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $l$  и мощность сил трения  $N_{mp}$  определяются по алгоритму математической модели процесса изнашивания волочильного инструмента [4]. В связи с тем, что  $I_{\omega}$  определен с вероятностью  $\gamma = 0,99$  и пределом  $P = 0,9$  попадания в доверительный интервал, значение ресурса  $T_{\gamma} = T_{90}$  определяется с вероятностью безотказной работы  $P = 0,9$ , при этом волочильный инструмент отнесен к ответственным триботехническим изделиям второго класса надежности [2].

#### Библиографический список

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
2. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
4. Моделирование процесса изнашивания волочильного инструмента / Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С. // Процессы и оборудование металлургического производства. Межрегион. сб. науч. трудов / Под ред. Железкова О.С. Вып. 6. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 95–100.
5. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. М.: Металлургия, 1982. 312 с.
6. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2 т. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алипина. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 400 с.

УДК 669.1.002.5-192

В. П. Анцупов, О. В. Семенова, А. В. Анцупов, А. С. Быков, И. Н. Мингазов

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОЛОЧИЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЕГО ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Волоочильный инструмент является элементом сложного технического устройства (волоочильного стана) и как объект рассмотрения может именоваться изделием, к которому применимы стандартные термины и определения надежности (ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия и определения»). Согласно ГОСТ 22.851-77 «Выбор номенклатуры показателей качества продукции» [1, 2], надежность изделия рассматривается как одно из главных свойств, определяющих его качество. Термин «надежность» формируется на основе базового понятия «работоспособность» – свойство изделия выполнять за-

данные функции, сохраняя значения выходных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией (техническими условиями). Выходные параметры называют показателями качества изделия 1-го уровня [3].

Для волочильного инструмента выходными параметрами являются геометрические и микрогеометрические характеристики, физико-механические свойства, параметры структуры поверхностного слоя и др. Так как уровень их значений формируется в технологическом процессе изготовления волочильного инструмента и однозначно определяется с помощью специальных средств

измерения, их можно назвать «выходными технологическими параметрами» (ВТП) волоочильного инструмента.

По определению понятия «работоспособность» диапазон изменения (ухудшения) выходных параметров (ВТП) инструмента при эксплуатации (волочении) определяет длительность его непрерывной работы до наступления предельного состояния, т. е. его ресурс  $T_{\gamma}$  – основной показатель его надежности и качества.

С другой стороны, поскольку более 90% всех отказов волоочильного инструмента являются постепенными (износными) отказами [4], то интенсивность ( $I$ ) изнашивания его поверхности с заданными ВТП (или её износостойкость  $I$ ), зависит от условий фрикционного взаимодействия (трения при волочении) и также определяет ресурс работы волоочильного инструмента  $T_{\gamma}$  как главный показатель эксплуатационной (трибологической) надежности.

Таким образом, как улучшение ВТП, формируемых при изготовлении волоочильного инструмента, так и снижение интенсивности изнашивания  $I$  его рабочей поверхности (повышение её износостойкости  $I$ ), зависящее от эксплуатационных (технологических и фрикционных) характеристик, предполагают повышение долговечности, надежности и, следовательно, качества волоочильного инструмента.

Согласно комплекту документов «Единый порядок систематической оценки технического уровня и качества машин, оборудования и другой техники», 1982 г. (ГОСТ 22851 «Выбор номенклатуры показателей качества промышленной продукции», «Отраслевая методика оценки уровня качества продукции»), методики КС УКП и ГОСТ 22851, волоочильный инструмент как

промышленная продукция второго класса пятой группы (как ремонтируемые изделия) должна квалифицироваться по тринадцати группам показателей качества, одиннадцать из которых являются обязательными. Поскольку в действующих отраслевых стандартах на волоочильный инструмент регламентированы только три единичных показателя (табл. 1 и 2, графа 6) и только одной группы качества, следует считать, что указанные нормативные документы на настоящий момент не являются руководящими, а качество волоочильного инструмента неконтролируемым. Таким образом, очевидно, что действующие в настоящее время отраслевые нормативные документы требуют существенной доработки как в плане увеличения числа технологических показателей качества первого уровня, так и их качественного содержания.

Согласно ГОСТ 15467 «Управление качеством продукции» для создания нормативных документов, способных контролировать качество волоочильного инструмента, необходимо, на наш взгляд, рекомендовать представленный в табл. 2 перечень ВТП (показателей качества первого уровня) из десяти характеристик. Их значения должны соответствовать международным стандартам (см. табл. 2, графа 8).

В графе 7 табл. 2 экспериментальными исследованиями [4] определены фактические значения всех десяти характеристик по типовой технологии изготовления волоочильного инструмента. Из графы 10 а, табл. 2 видно, что для семи из десяти показателей значение  $q_i < 1$ , это говорит о том, что помимо создания новой НТД, требует существенного улучшения существующая схема собственно технологического процесса производства стандартного волоочильного инструмента.

Для повышения качества волоочильного инструмента в работах [5, 6] разработана новая технология изготовления волоочильного инструмента с применением новых операций: способа высоких гидростатических давлений (ВГД) при изготовлении заготовок-волоков и чистовая операция алмазно-электролитического выглаживания (АЭВ) рабочего канала волока на конечном этапе изготовления. Новая технология позволила существенно улучшить значения показателей качества первого уровня (ВТП) (см. табл. 2, графа 9) по сравнению с международными требованиями (табл. 2, графа 8).

Расчет относительных показателей уровня технологии  $q_i$  представлен в столбце 10 б, табл. 2. Очевидно, что практически все показатели значительно выше единицы ( $q_{cp} \approx 1,31$ ), а предложенная технология является вполне конкурентоспособной на внешнем и внутреннем рынке.

Таблица 1

Физико-механические свойства твердых сплавов (ГОСТ 3882)

Марка	Код ОКП	Физико-механические свойства		
		Предел прочности при изгибе, Н/мм <sup>2</sup> не менее	Плотность, $\times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Твердость HRA, не менее
1	2	3	4	5
ВК3	196522	1176	15,0–15,3	89,5
ВК6	196524	1519	14,6–15,0	88,5
ВК3-М	196511	1176	15,0–15,3	91,0
ВК6-М	196512	1421	14,8–15,1	90,0
ВК6-ОМ	196516	1274	14,7–15,0	90,5
ВК6-В	196532	1666	14,6–15,0	87,5
ВК8	196525	1666	14,5–14,8	88,0
ВК8-В	196533	1813	14,4–14,8	86,5
ВК8-ВК	196535	1764	14,5–14,8	87,5

Анализ показателей качества волоочильного инструмента

№ п/п	Наименование показателя качества волоочильного инструмента	Вид показателя	Обозначение	Ед. изм.	Величина показателя волоочильного инструмента из сплава ВК 6				$q_i^*$	
					По ГОСТ 3882	Серийного (по типовой технологии)	Планируемого (по зарубежным источникам)	Фактического (по новой ВГД-АЭВ технологии)	Типовой	ВГД-АЭВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 а	10 б
1	Выходные технологические параметры (ВТП) (показатели качества 1-го уровня): $p_1$ – прочность при изгибе, не менее	ед.	$\sigma_{B u}$	МПа	1500	1500	1500	1700	1	1,13
2	$p_2$ – плотность, не менее	ед.	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	14,3·10 <sup>3</sup>	14,6·10 <sup>3</sup>	14,8·10 <sup>3</sup>	14,8	0,99	1,0
3	$p_3$ – твердость, не менее	ед.	$HRA$	ед.	88,5	89	89	89–90	1	1,01
4	$p_4$ – размер зерен WC, не более	ед.	$d_{wc}$	мкм	–	10–20	6	5	0,25	1,2
5	$p_5$ – количество мелких зерен WC, не менее	ед.	$K_{dwc}$	%	–	10–20	70	70–90	0,21	1,14
6	$p_6$ – пористость (степень), не более	ед.	$\Pi$	%	–	0,5	0,2	0,2	0,4	1,0
7	$p_7$ – предел прочности при сжатии, не менее	ед.	$\sigma_{B сж}$	МПа	–	4300	5800	5300	0,74	0,91
8	$p_8$ – остаточная деформация сжатия, не менее	ед.	$\varepsilon_{ост}$	%	–	0,5	0,875	3,0	0,57	3,42
9	$p_9$ – шероховатость поверхности, не более	ед.	$R_a$	мкм	–	0,4	0,08	0,01–0,04	0,2	2,3
10	$p_{10}$ – остаточные поверхностные напряжения	ед.	$\sigma_{ост}$	МПа	–	Растяжения (-)	Сжатия (+)	~ +1400	>1	>1

\*  $q_i$  – относительный показатель уровня технологии по  $i$ -му ( $i=1...10$ ) показателю качества волоочильного инструмента по сравнению со значением показателей зарубежных аналогов;  $q_i = p_{iГ}/p_{iП}$  или  $q_i = p_{iП}/p_{iГ}$  из формул выбирают ту, при которой увеличению относительного показателя  $q_i$  отвечает улучшение качества волоочильного инструмента; ед. – единичный.

Для промышленной реализации ВГД-АЭВ технологии и оборудования разработаны и утверждены соответствующие нормативные документы:

- технические условия ТУ И4-4-1679-91 «Заготовки твердосплавные для изготовления волок повышенной стойкости».
- технологическая инструкция ТИ 176-МТ. ПР. 03-244-99 «Электролитическая обработка твердосплавных волок поликристаллическими катодами».
- технологическая инструкция ТИ 176-МТ.ПР. 03-243-99 «Изготовление конических инструментов – катодов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми материалами».

- РКД № 2102 на установку для алмазной электролитической обработки волок;
- РКД № 2301 на изготовление поликристаллических катодов;
- технико-экономическое задание на изготовление опытно-промышленной партии твердосплавных заготовок для волок, полученных при высоких гидростатических давлениях;
- техническое задание на разработку и внедрение процесса алмазно-электролитической обработки поликристаллическими катодами твердосплавных волок, специального станка и инструментов для ее осуществления.

#### Библиографический список

1. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
3. Черновол М.И. и др. Повышение качества восстановления деталей машин. К.: Техника, 1989. 168 с.
4. Повышение износостойкости рабочего канала твердосплавных волок диаметром менее 2 мм / Семенова О.В., Хухарева И.Н., Скорняков В.П. и др. // Сталь. 1991. № 2. С. 40.

5. Вайнер И.Л., Семенова О.В. Волоочильный инструмент, изготовленный методом гидростатических давлений // Состояние и основные направления по совершенствованию производства проволоки для игл: Сб. науч. тр. Ижевск: НИИМТ, 1991. С. 73–75.
6. Алмазно-электролитическая обработка твердосплавных волок поликристаллическими катодами / Семенова О.В., Гурвич Р.А., Пудов Е.А. и др. // Сб. статей семинара. Вологда, 1996. С. 93–95.

УДК 669.1.002.5-192

В. П. Анцупов, О. В. Семенова, А. В. Анцупов, А. С. Быков, М. В. Налимова

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ НА ИЗНОС ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА

При проведении теоретических исследований ставили задачу выявить не только наиболее значимые параметры технологического процесса, влияющие на линейный износ волоочильного инструмента, но и оценить изменение износа при их комплексном взаимодействии. Кроме того, при проведении теоретических исследований показано сравнение результатов влияния технологических параметров на износ серийного волоочильного инструмента и планируемого волоочильного инструмента с выходными параметрами, соответствующими международным требованиям (см. табл. 1, графа 8 в предыдущей статье). С этой целью рассчитана интегральная энергетическая интенсивность изнашивания поверхности нового (планируемого) волоочильного инструмента.

Используя физический смысл показателя  $K_u$  относительной износостойкости, значение энергетической интенсивности изнашивания поверхности нового  $I_\omega^{nl}$  (с планируемыми ВТП) волоочильного инструмента можно записать как:

$$I_\omega^{nl} = I_\omega^{эм} \cdot K_u. \quad (1)$$

В качестве  $I_\omega^{эм}$  в нашем случае следует принять значение энергетической интенсивности изнашивания серийного волоочильного инструмента  $I_\omega^{эм} = I_\omega^{cep} = 3,5 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м [1], а выражение для коэффициента  $K_u$  найти, рассматривая подходы для его оценки различных авторов из обзора, представленного в работе [2]. При этом в выражении для  $K_u$  должно быть учтено по возможности наибольшее число изменяющихся планируемых ВТП нового волоочильного инструмента.

Например, если в условии (1) коэффициент  $K_u$  определять из выражения Р. Кохл  $\bar{E}_B = (\sigma_{0,2} + \sigma_B) \cdot \varepsilon_B / 2$  [2] с учетом эмпирической зависимости М.Е. Лошака [3], связывающей предел текучести  $\sigma_{0,2}$  твердых сплавов с со-

держанием в них кобальтовой основы  $V_{co}$  и величиной зерна  $d_{wc}$  карбида вольфрама:  $\sigma_{0,2} = (80 + 30 \cdot d_{wc})^{-1/2} / (1 + 8,3 \cdot V_{co})$ , то после некоторых преобразований получим выражение для оценки энергетической интенсивности изнашивания волоочильного инструмента с новыми (планируемыми), указанными выше, показателями качества 1-го уровня:

$$I_\omega^{nl} = I_\omega^{cep} \cdot K_{ui} = I_\omega^{cep} \cdot K_{\varepsilon_{ocm}} \cdot K_{V_{co}} \cdot K_{HRC} \times \frac{(d_{wc}^{cep})' + (V_{co}^{cep})' \cdot \sigma_B^{cep}}{(d_{wc}^{nl})' + (V_{co}^{nl})' \cdot \sigma_B^{nl}}, \quad (2)$$

где  $K_{\varepsilon_{ocm}} = \varepsilon_{ocm}^{cep} / \varepsilon_{ocm}^{nl}$ ;  $K_{V_{co}} = (V_{co}^{nl})' / (V_{co}^{cep})'$ ;

$$(d_{wc})' = 80 + 30 d_{wc}^{1/2}; \quad (V_{co})' = 1 + 8,3 V_{co}.$$

Для значений планируемых выходных технологических параметров волоочильного инструмента (см. табл. 2, графа 8 в предыдущей статье) расчёт по условию (2) показывает, что  $I_\omega^{nl} = 1,71 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м.

После разработки новой ВГД-АЭВ технологии [4, 5] для изготовления волоочильного инструмента с улучшенными (см. табл. 2, графа 9 в предыдущей статье) выходными параметрами (ВТП) в работе [1] определена энергетическая интенсивность изнашивания её рабочей поверхности  $I_\omega^{факт} = 1,26 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м.

Теоретическая трибодиагностика инструмента с прогнозируемыми ВТП и с ВТП по ВГД-АЭВ технологии показала, что остальные эксплуатационные показатели качества 2-го уровня для одинаковых условий волочения составляют:

- интегральная линейная интенсивность изнашивания  $I_h^{cep} = 1,8 \cdot 10^{-11} - 1,1 \cdot 10^{-10}$ ;

- интегральная энергетическая интенсивность изнашивания  $I_{\omega}^{cep} = 3,5 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м;
- износостойкость  $II^{cep} = 9,1 \cdot 10^9 - 5,6 \cdot 10^{10}$ ;
- класс и разряд износостойкости  $KI/p^{cep} = 9/5 - 10/4$ ;
- «энергетическая» износостойкость  $I_{\omega}^{cep} = 2,86 \cdot 10^9$  Н·м/мм<sup>3</sup>.

Для планируемого волочильного инструмента (с ВТП по зарубежным источникам):

- интегральная линейная интенсивность изнашивания  $I_h^{nl} = 8,8 \cdot 10^{-12} - 5,4 \cdot 10^{-11}$ ;
- интегральная энергетическая интенсивность изнашивания  $I_{\omega}^{nl} = 1,71 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м;
- износостойкость  $II^{nl} = 1,85 \cdot 10^{10} - 1,13 \cdot 10^{11}$ ;
- класс и разряд износостойкости  $KI/p^{nl} = 10/2 - 11/1$ ;
- «энергетическая» износостойкость  $I_{\omega}^{nl} = 5,85 \cdot 10^9$  Н·м/мм<sup>3</sup>.

Для волочильного инструмента, изготовленного по АЭВ-ВГД технологии:

- интегральная линейная интенсивность изнашивания  $I_h^{факт} = 6,3 \cdot 10^{-12} - 3,96 \cdot 10^{-11}$ ;
- интегральная энергетическая интенсивность изнашивания  $I_{\omega}^{факт} = 1,26 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м;
- износостойкость  $II^{факт} = 2,53 \cdot 10^{10} - 1,59 \cdot 10^{11}$ ;
- класс и разряд износостойкости  $KI/p^{факт} = 10/3 - 11/2$ ;
- «энергетическая» износостойкость  $I_{\omega}^{факт} = 7,94 \cdot 10^9$  Н·м/мм<sup>3</sup>.

Из сравнения значений эксплуатационных показателей очевидно, что качество волочильного инструмента, изготовленного по АЭВ-ВГД технологии, существенно выше не только качества серийного волочильного инструмента, но и инструмента с ВТП, соответствующими зарубежным стандартам.

Кроме того, найденные значения энергетической интенсивности изнашивания для исследуемых волок позволяют теоретически сравнить величины абсолютного износа инструмента с различными ВТП и также оценить эффективность применения новой технологии. На базе анализа многочисленных данных компьютерного экспери-

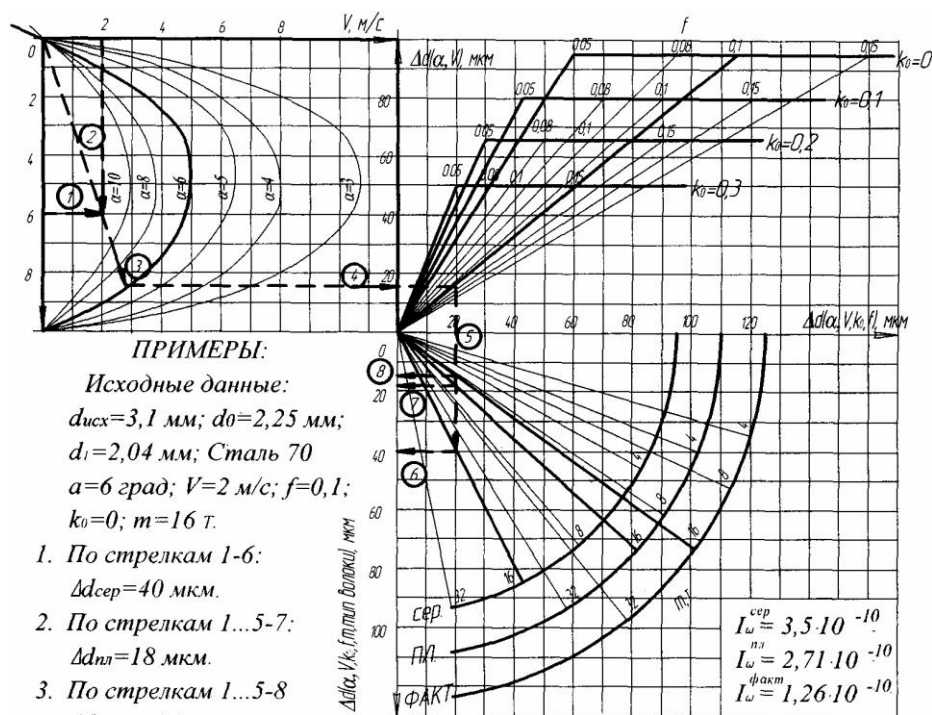
мента и использования правил номографирования была создана методика построения типовых номограмм (см. рисунок) оценки текущего износа волок различной интенсивности изнашивания их поверхности в функции наиболее значимых параметров волочения для заданного в маршруте перехода.

Каждая номограмма является графической интерпретацией приближенного решения основного уравнения изнашивания с использованием алгоритма расчета мощности сил трения по математической модели [1].

При работе с номограммой прослеживается влияние на величину ожидаемого износа инструмента: изменения полуугла волокни  $\alpha$ , скорости волочения  $V$ , коэффициента трения  $f$ , массы заготовки  $m$  и энергетической интенсивности изнашивания  $I_{\omega}$  при волочении заготовки заданных размеров и механических свойств в одном переходе.

Оценку величины ожидаемого износа по номограмме можно проследить на трех примерах при волочении проволоки из ст. 70 из исходной заготовки  $d_{исх} = 3,1$  мм на переходе  $d_0 = 2,25$  мм в  $d_1 = 2,04$  мм, для  $\alpha = 6^\circ$ ,  $V = 2$  м/с,  $f = 0,1$ ,  $m = 16$  т (см. рисунок):

- по стрелкам 1...5-6 (для серийной проволоки с  $I_{\omega}^{cep} = 3,5 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>/Н·м)  $\Delta d_{cep} \approx 40$  мкм;
- по стрелкам 1...5-7 (для волок с прогнозируемыми (планируемыми) ВТП, соответ-



Типовая номограмма для определения износа волок

вующими международному уровню с  $I_{\omega}^{nl} = 1,71 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$   $\Delta d_{nl} \approx 19 \text{ мкм}$ ;

- по стрелкам 1...5–8 (для волок с фактическими ВТП по АЭВ-ВГД технологии с  $I_{\omega}^{факт} = 1,26 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$   $\Delta d_{факт} \approx 14 \text{ мкм}$ .

Точный расчет этих значений по программе показывает, что  $\Delta d_{сер} = 42,1 \text{ мкм}$ ,  $\Delta d_{nl} = 19,43 \text{ мкм}$ ,  $\Delta d_{факт} = 14,12 \text{ мкм}$ .

Типовые номограммы не предполагаются к практическому использованию в промышленных условиях и служат лишь для демонстрационного показа работы компьютерной программы, оценки качественного (приближенного) комплексного влияния технологических параметров на из-

нос, эффективности использования волок с различными ВТП и удобны для работы со студентами в учебном процессе. В частности, приведенные примеры оценки ожидаемого износа показывают, что волокни с планируемыми выходными параметрами в  $\sim 2,17$  раз эффективнее серийных по величине ожидаемого износа, а волокни, изготовленные по новой технологии с использованием метода высоких гидростатических давлений (ВГД) и чистовой операции алмазно-электролитического выглаживания (АЭВ), имеют износостойкость в  $\sim 2,76$  раз выше серийных и в  $\sim 1,35$  раз выше волок с ВТП, соответствующим зарубежным аналогам.

#### Библиографический список

1. Моделирование процесса изнашивания волочильного инструмента / Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С. // Процессы и оборудование металлургического производства: Межрегион. сб. науч. трудов / Под ред. Железкова О.С. Вып. 6. Магнитогорск: МГТУ, 2004. С. 95–100.
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов: Учебник для вузов. М.: Недра, 1996. 364 с.
3. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наук. думка, 1984. 328 с.
4. Вайнер И.Л., Семенова О.В. Волочильный инструмент, изготовленный методом гидростатических давлений // Состояние и основные направления по совершенствованию производства проволоки для игл: Сб. науч. тр. Ижевск: НИИМТ, 1991. С. 73–75.
5. Алмазно-электролитическая обработка твердосплавных волок поликристаллическими катодами / Семенова О.В., Гурвич Р.А., Пудов Е.А. и др. // Сб. статей семинара. Вологда, 1996. С. 93–95.

УДК 669.002.5

Н. Н. Огарков, Н. В. Мазур

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ РОЛИКОВ МНЛЗ

Взаимодействие роликов МНЛЗ с горячей непрерывно-литой заготовкой вызывает в них большие термические напряжения и, как следствие, образование на их поверхностях микротрещин. В процессе переточки необходимо полностью удалять такие трещины. На практике глубину распространения трещин от поверхности ролика определяют методом пробных врезаний резца, что является трудоемким и требует использования специальных методов дефектоскопии.

В настоящей работе предлагается расчетный метод определения глубины распространения трещин в поверхностном слое роликов МНЛЗ в зависимости от условий их эксплуатации.

Условия контактного взаимодействия горячего металла и роликов позволяют принять источник теплоты, действующий на поверхности ролика, полосовым с равномерной интенсивностью вдоль образующей ролика. Решение задачи упрощается, если источник теплоты принять бы-

стродвижущимся. Погрешности тепловых расчетов становятся незначительными, если число Пекле  $Pe \geq 10$ . Для условий эксплуатации роликов МНЛЗ число Пекле  $Pe = 15...20$ , что дает возможность принять источник теплоты быстро движущимся.

С учетом принятых допущений распределение температуры в поверхностном слое ролика можно описать следующими зависимостями:

по оси ролика

$$Q_z = Q_m \left( 1 - \frac{z^2}{z_m^2} \right); \quad (1)$$

по радиусу ролика

$$Q_r = Q_m \exp \left( -\frac{r^2}{4\alpha t} \right), \quad (2)$$

где  $Q_m$  – температура непрерывно-литой заготовки;  $z$  – координата направленная вдоль оси

ролика;  $z_m$  – координата в середине ролика;  $r$  – координата по радиусу ролика;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности;  $t$  – время действия теплового источника.

Для оценки градиента температуры по осям  $z$  и  $r$  возьмем производные  $\partial z$  и  $\partial r$ , в результате чего получаем

$$\frac{\partial r}{\partial z} = \frac{4\omega t}{z_m^2} \frac{z}{rt} \exp\left(\frac{r^2}{4\omega t}\right). \quad (3)$$

Полученное соотношение показывает, что порядок малости  $\delta r$  толщины слоя будет более высоким, чем порядок малости  $\delta z$ . По поверхности контакта ролика с непрерывно-литой заготовкой отношение порядков толщин  $\delta r/\delta z \rightarrow 0$ . Уравнение теплопроводности в общем виде имеет вид

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \omega \left( \frac{\partial Q}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial Q}{\partial z} + \frac{\partial^2 Q}{\partial r^2} \right). \quad (4)$$

Для членов правой части уравнения (4) порядок будет

$$\frac{\partial Q}{\partial z^2} \approx \frac{\partial Q}{\delta z^2}; \quad \frac{1}{z} \frac{\partial Q}{\partial z} \approx \frac{1}{z} \frac{\partial Q}{\delta z}; \quad \frac{\partial^2 Q}{\partial r^2} \approx \frac{\partial^2 Q}{\delta r^2}.$$

Поскольку, как показано выше,  $\delta r/\delta z \rightarrow 0$ , то слагаемые  $\frac{\partial Q}{\delta z^2}$  и  $\frac{1}{z} \frac{\partial Q}{\delta z}$  являются очень малыми

по сравнению с величиной  $\frac{\partial^2 Q}{\delta r^2}$ . Таким образом,

градиент температуры по радиусу ролика на порядок выше градиента температуры вдоль его оси. Считая первые слагаемые в уравнении теплопроводности по сравнению с третьим очень малыми, с определенной погрешностью можно записать

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \omega \frac{\partial^2 Q}{\partial r^2}. \quad (5)$$

В соответствии с уравнением (5) влияние градиента температур по оси ролика на образование трещин не учитываем и полагаем, что развитие трещин происходит только под воздействием градиента температуры по радиусу ролика при тепловом ударе в момент соприкосновения с горячим металлом.

Зарождение и развитие трещин в поверхностном слое ролика в дальнейшем рассматриваем применительно к поликристаллической структуре материала ролика МНЛЗ.

Зарождение термических трещин на поверхности и их распространение вглубь ролика воз-

можно только при условии, что напряжение будет достаточным для распространения трещины из деформированного зерна в недеформированное зерно, т.е. что эффективная поверхностная энергия, выделяющаяся при распространении трещины, превышает критическое значение [1].

$$\sigma_s \geq \sqrt{\frac{4E\gamma}{\pi(1-\nu^2)d}}, \quad (6)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, в котором распространяется трещина;  $\gamma$  – эффективная поверхностная энергия, выделяющаяся при распространении трещины;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $d$  – размер зерна.

Легированные марки стали обычно имеют коэффициент Пуассона равным 0,3, поэтому выражение (6) можно упростить:

$$\sigma_s \geq 1,18 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}. \quad (7)$$

Термические напряжения на поверхности ролика в зоне контакта с горячим металлом равны

$$\sigma_s = \beta_t E (Q_m - Q_s), \quad (8)$$

где  $Q_s$  – температура внутреннего контура поверхностного слоя, в котором распространяются термические трещины;  $\beta_t$  и  $E$  – коэффициент линейного расширения и модуль упругости материала поверхностного слоя ролика.

Приравняв правые части уравнений (7) и (8) и решая относительно  $Q_s$ , получим

$$Q_s = \frac{\beta_t E Q_m - 1,18 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}}{\beta_t E}. \quad (9)$$

Согласно уравнению (2) размер поверхностного слоя, в котором развиваются трещины в соответствии с условием (9) по радиусу ролика, определяется выражением

$$\delta_s = 2 \sqrt{\omega t \ln \left( \frac{Q_m}{Q_s} \right)}. \quad (10)$$

Подстановкой  $Q_s$  из уравнения (9) в уравнение (10) получим

$$\delta_s = 2 \sqrt{\omega t \ln \left[ \frac{\beta_t E Q_m}{\beta_t E Q_m - 1,18 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}} \right]}. \quad (11)$$

Поскольку время действия теплового источника на распространение трещин определяется соотношением  $t = \delta/v_n$ , где  $v_n$  – скорость распространения пластических волн перед вершиной трещины, то подстановкой значения  $t$  в формулу (11) имеем

$$\delta_s = \frac{4\omega}{v_n} \ln \left[ \frac{\beta_t E Q_m}{\beta_t E Q_m - 1,18 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}} \right]. \quad (12)$$

Теория распространения пластической деформации показывает, что ее скорость определяется формулой

$$v_n = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}}, \quad (13)$$

где  $\sigma, \varepsilon$  – условные напряжения и деформации;  $\rho$  – плотность материала, в котором распространяются пластические волны.

В общем случае процесс деформационного упрочнения и разупрочнения описывается известным из теории пластичности уравнением

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \frac{d\dot{\varepsilon}}{d\varepsilon} + \frac{\partial \sigma}{\partial Q} \frac{dQ}{d\varepsilon} \quad (14)$$

где  $\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, Q$  – соответственно напряжение, степень, скорость и температура деформации материала.

Каждому члену в первой части этого уравнения, если он становится отрицательным, соответствует источник неустойчивости. Обычно считается, что только производная  $\frac{\partial \sigma}{\partial Q}$  может

быть отрицательной, т.е. источником неустойчивости пластического течения считается склонность к адиабатическим процессам деформации.

Применительно к условиям зарождения и распространения трещин, склонность к адиабатическому процессу в пластической зоне, прилегающей к вершине трещины, возрастает с увеличением скорости распространения трещины. Причем, чем больше интенсивность выделения поверхностной энергии при распространении трещины, тем больше проявляется зависимость деформационного разупрочнения от локального повышения температуры и, как следствие, зависимость скорости распространения пластической деформации у вершины трещины.

Для описания этого явления обратимся к уравнению (14), принимая во внимание, что

$\frac{dQ}{d\varepsilon} = \frac{k'\sigma}{c}$ , а зависимость напряжения течения материала валка от скорости деформации имеет вид  $\sigma = M \dot{\varepsilon}^m$ , где  $k'$  – доля тепла, сохраняемого в зоне его образования,  $\sigma$  – напряжение течения,  $c$  – коэффициент теплоемкости,  $M$  – коэффициент пропорциональности,  $m$  – показатель зависимости напряжения течения от скорости деформации.

Увеличение скорости пластической деформации у вершины трещины практически не изменяет первый член уравнения (14) ввиду того, что степень пластической деформации в пластической зоне у вершины трещины достигает величины, равной  $\ln(1+\varepsilon_n)$ , где  $\varepsilon_n$  – деформация, соответствующая началу разрушения материала и зарождению трещины. Производная  $\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}}$  стремится к нулю, так как показатель зависимости  $m < 1$ , а величина  $k' \rightarrow 1$ . При существенном изменении температуры и сильной зависимости напряжения течения от температуры  $\frac{\partial \sigma}{\partial Q}$  влияние третьего члена

на деформационное упрочнение и соответственно скорость распространения трещины в поверхностном слое ролика может быть значительным и поэтому его учет является обязательным.

Таким образом, при рассмотренных условиях распространения трещины, применительно к пластической зоне у вершины трещины, уравнение (14) сводится к виду

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma_\varepsilon. \quad (15)$$

Пластическая деформация в этом случае распространяется со скоростью

$$v_n = \sqrt{\frac{\sigma_\varepsilon}{\rho}}. \quad (16)$$

Подставляя значение  $v_n$  в уравнение (12), имеем

$$\delta_s = 4\omega \sqrt{\frac{\rho}{\sigma_\varepsilon}} \ln \left[ \frac{\beta_t E Q_m}{\beta_t E Q_m - 1,18 \sqrt{\frac{E\gamma}{d}}} \right]. \quad (17)$$

Значение  $\sigma_\varepsilon$  определим по обобщенной формуле, охватывающей влияние температуры на



грева, степени и скорости деформации, полученной М.А. Зайковым [4]:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_n \cdot Z_T \cdot Z_{\dot{\varepsilon}} \cdot Z_{d}, \quad (18)$$

где  $\sigma_n$  – предел упрочнения при скорости статических испытаний, экстраполированный до температуры плавления, для легированной стали  $\sigma_n = 3(1+2C) \cdot M_c$ , МПа;  $C$  – содержание углерода, %;  $M_c$  – коэффициент, учитывающий влияние других легирующих элементов;

$$Z_T = \exp \left[ A \left( 1 - \frac{Q_m + 273}{Q_{nl} + 273} \right) \right] - \text{температурный}$$

множитель;  $A$  – температурный коэффициент;  $Q_{nl}$  – температура плавления металла поверхностного слоя ролика, °С;  $Z_{\dot{\varepsilon}}$  – скоростной множитель;  $Z_d$  – множитель, учитывающий упрочнение металла в процессе деформирования.

Величина коэффициента  $A$  зависит от скорости испытаний образцов. Скорость статических испытаний для опытных данных, приводимых в литературе, обычно равна  $3 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ . Для такой скорости деформации М.А. Зайков получил для всех металлов температурный коэффициент  $A = 7,45$ .

В соответствии с анализом уравнения (14) влиянием скорости и степени пластической деформации на напряжение предела текучести можно пренебречь и принять  $Z_\varepsilon = 1$  и  $Z_{\dot{\varepsilon}} = 1$ .

Ролики МНЛЗ преимущественно изготавливаются из легированной стали 25Х5ФМС. Для данной легированной стали коэффициент  $M_c = 1$ . Следовательно, зависимость (18) для размерности МПа может быть представлена в виде

$$\sigma_\varepsilon = 3(1+2C) \exp 7,45 \left( 1 - \frac{Q_m + 273}{Q_{nl} + 273} \right), \quad (19)$$

где  $Q_m$  – температура плавления материала поверхностного слоя ролика, °С.

Исследование структуры материала роликов МНЛЗ, изготовленных из стали 25Х5ФМС, показало, что ее зернистость соответствует в среднем шестому баллу. В соответствии с ГОСТ 5639-82 размер зерна шестого балла равен 0,044 мм. Эффективная поверхностная энергия для сталей по данным [1, 2] составляет  $2 \cdot 10^{-5} \text{ МДж/м}^2$ .

Принимая модуль упругости для материала роликов  $E = 2,15 \cdot 10^5$  МПа и подставляя полученные значения  $\sigma_\varepsilon$ ,  $\gamma$  и  $d$  в уравнение (17), получим

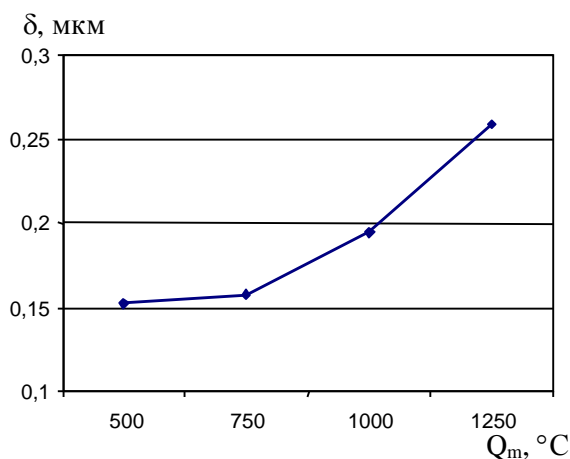
$$\delta = 4\omega \sqrt{\frac{\rho}{3(1+2C) \exp 7,45 \left( 1 - \frac{Q_m + 273}{Q_{nl} + 273} \right)}} \times \ln \left[ \frac{\beta_t E Q_m}{\beta_t E Q_m - 370} \right]. \quad (20)$$

Анализ размерностей величин, входящих в формулу (20), показывает, что размерность плотности материала роликов должна быть в МПа·с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>. Учитывая, что плотность для стали  $\rho = 7,8 \text{ т/м}^3$  эквивалентно  $\rho = 0,0765 \text{ МПа} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$ , получим окончательно

$$\delta = 1,1\omega \sqrt{\frac{1}{3(1+2C) \exp 7,45 \left( 1 - \frac{Q_m + 273}{Q_m + 273} \right)}} \times \ln \left[ \frac{\beta_t E Q_m}{\beta_t E Q_m - 370} \right]. \quad (21)$$

Полученная формула позволяет рассчитывать размер зарождающихся микротрещин в поверхностном слое роликов МНЛЗ в зависимости от температуры непрерывно-литой заготовки, теплофизических и механических свойств материала поверхностного слоя роликов. На рисунке представлена зависимость размеров трещин в поверхностном слое роликов от температуры непрерывно-литой заготовки.

Приведенные на рисунке данные показывают, что с увеличением температуры непрерывно-литой заготовки на поверхности роликов зарождаются более глубокие трещины. Размер зарож-



Зависимость величины трещины зарождающейся на поверхности ролика МНЛЗ от температуры непрерывно-литой заготовки

дающихся микротрещин меньше размеров зерен материала роликов, что способствует как внутризеренному, так и межзеренному механизму распространения трещин. Знание закономерности распространения трещин внутри материала в зависимости от числа термических циклов позволяет рассчитать количество плавок, которое

способен выдержать ролик при распространении трещины до критической величины.

Материалы данной работы могут быть использованы при прогнозировании стойкости роликов при составлении графиков ремонтных работ и при нормировании величин съема металла с поверхности роликов при их ремонтах.

#### **Библиографический список**

1. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1978.
  2. Броек Д. Основы механики разрушения: Пер. с англ. М.: Высш. шк., 1980.
  3. Миллер К. Ползучесть и разрушение: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1986.
  4. Зайков М.А. Режимы деформации и усилия при горячей прокатке. М.: Металлургиздат, 1960.
-

**РЕФЕРАТЫ**

УДК 621.797.99

Реновация деталей металлургического оборудования наплавкой / Кашенко Ф.Д., Беляев А.И. // Вестник МГТУ им. Г.И.Носова. 2006. № 1. С. 3–6.

Рассмотрены подходы к реновации металлургического оборудования наплавкой. Предложены различные способы восстановления деталей. Приведена классификация наплавленного металла на основе железа с рекомендациями по конкретным видам металлургического оборудования. Соответственно рекомендованы наплавочные материалы: проволока стальная наплавочная сплошного сечения; проволока стальная сварочная сплошного сечения для наплавки; порошковые ленты для наплавки.

Табл. 5.

УДК 338.51

Проблемы проведения ремонтов и обновления основных производственных фондов доменного производства / Баскакова Н.Т., Куликов С.А., Васильева Н.Ф., Кадошников В.И. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С.6–9.

Предложены варианты решения проблем проведения ремонтов и обновления основных производственных фондов.

Ил. 4.

УДК 621.771

Исследование утяжки вершин профиля ромбовидного сечения при роликовом волочении с перекосом / Кадошников В.И., Кургузов С.А., Кургузов А.С. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 9–11.

С целью получения профиля с ромбовидного сечения с различными радиусами скругления вершин проведены эксперименты по волочению фасонного профиля с перекосом волокна.

Ил. 6. Библиогр. 2 назв.

УДК 621.73.073

Математическая модель формоизменения металла при поперечном выдавливании / Малышева М.С., Белан А.К. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 11–13.

Разработана математическая модель, основанная на методе конечных элементов, адаптированная к условиям формоизменения металла при поперечном выдавливании стержневых изделий с головкой увеличенного размера.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

УДК 621.771

Влияние межклетевой деформации на скоростной режим в блоках с групповым приводом / Белан А.К., Моторыгин М.Е. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 14–15.

Предложены отношения для определения необходимых рассогласования скоростей и передаточных отношений для прокатки полосы без межклетевой деформации в условиях чистового блока проволочного стана с групповым приводом.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

УДК 378.147.88

Проектная деятельность как основной компонент проектного образования в рамках технического университета / Усагая Т. В. Вестник МГТУ. 2006 № 1. С. 16–18.

Описана авторская методика развития проектной деятельности будущих инженеров.

Библиогр. 7 назв.

УДК 669.771.42

Проектирование устройства для подготовки поверхности сердечника механическим способом / Кадошников В.И., Вдовин К.Н., Куликова Е.В., Кадошникова И.Д., Куликов С.В. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 19–22.

Предложено устройство, позволяющее обрабатывать поверхность сердечника равномерно по всему периметру, используя всего одну щетку.

Ил. 2. Библиогр. 6 назв.

УДК 378.147.88:744

К вопросу об организации самостоятельной работы в обучении графическим дисциплинам / Сви-стунова Е.А. / Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 22–24.

Предложена организация учебного процесса с помощью учебно-методического комплекса, кото-рый включает в себя задания для самоконтроля студентов по рейтинговой системе при изучении гра-фических дисциплин.

Библиогр. 7 назв.

УДК 378.147:004.92

Моделирование учебного процесса на основе применения технических средств / Савочкина Л.В. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 25–27.

Предложена модульная система обучения при организации дисциплины «Начертательная геомет-рия и инженерная графика» с применением технических средств.

Библиогр. 3 назв.

УДК 621.735.32.011.001

Методика определения усилий при поперечном выдавливании / Паршин В.Г., Белан А.К., Белан О.А., Малышева М.С. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 27–31.

Предложена методика расчета усилий при поперечном выдавливании в штампах с подпружинен-ным пуансоном, основанная на методе баланса работ. Данная методика может быть использована для проектирования деформирующего инструмента и разработки технологического процесса штамповки стержневых изделий с увеличенной головкой.

Ил. 2. Библиогр. 2 назв.

УДК 621.771.01

Напряжения в бандаже опорного вала / Москвин В.М., Кадошников В.И., Белевская Е.Л., Дан-ченко Е.А. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 31–34.

Определены напряжения в бандаже наложением напряжения от упругого сплющивания на на-пряжения от натяга.

Ил. 9. Библиогр. 3.

УДК 621.771.25 – 422.42

Метод определения рациональных схем прокатки высоких полос в черновых клетях сортовых ста-нов / Белан А.К., Кандауров Е.Л. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 34–37.

На основе теории устойчивости прямоугольных изотропных пластин разработана методика выбо-ра рациональных схем сортовой прокатки высоких полос.

Ил. 2. Библиогр. 4 назв.

УДК 621.771.2.09

Синтез структур многодвигательных машин с кинематической развязкой движения основных исполнительных звеньев / Макаров А.Н., Кутлубаев И.М. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 37–42.

В статье рассмотрены вопросы синтеза кинематически независимых приводов основных звеньев многодвигательных машин. Сформулированы общие принципы получения кинематически независимых движений основных звеньев.

Ил. 8. Библиогр. 5 назв.

УДК 621.752

Диагностирование золотниковых распределителей в гидроприводах металлургического оборудования / Кудряшов А.А., Решетников Д.А. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 42–44.

Предложен способ диагностирования золотниковых гидрораспределителей, основанный на анализе их виброакустических характеристик и позволяющий осуществлять оперативный контроль их технического состояния на рабочей позиции без вывода их из работы.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

УДК 621.771

Технологическое управление остаточными напряжениями при охватывающем деформировании / Зайдес С.А., Климова Л.Г., Пронькина С.А. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 44–48.

Технические проблемы, вызываемые технологическими остаточными напряжениями растяжения при холодном деформировании металлоизделий, могут быть успешно решены. Остаточные напряжения можно существенно уменьшить, полностью снять или даже изменить характер их распределения в объеме заготовки только за счет рационального назначения параметров и режимов обработки основного технологического процесса охватывающего деформирования.

Ил. 4. Библиогр. 4 назв.

УДК 621.86

Определение остаточной деформации облицовочной планки прокатной клетки с учетом ударно динамических напряжений / Кандауров Л.Е., Коковихин А.В., Ибрагимов Л.Е. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 48–50.

В работе представлена методика определения напряжений в зоне контакта подушки валка и станины с учетом динамических явлений, а также вычисление остаточной деформации облицовочной планки прокатной клетки с учетом динамических напряжений при ударе.

Ил. 2. Библиогр. 2 назв.

УДК 621.771

Влияние высоких температур на изнашивание материалов при абразивном износе / Л.Е. Кандауров, Н.В. Оншин, Н.Ш. Тютяряков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 50–53.

В работе представлены результаты экспериментального исследования зависимости показателей интенсивности изнашивания различных материалов от температуры. Результаты исследования представлены в графическом и аналитическом виде.

Ил. 2. Библиогр. 2 назв.

УДК 621.771

Метод определения прогибов линеек валковой арматуры переменного сечения / Н.В. Оншин, Н.Ш. Тютяряков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 53–55.

Разработан метод выбора рациональных размеров линеек валковой арматуры переменного сечения для прокатки сортовых профилей. Предложенный метод позволяет на стадии проектирования создавать детали валковой арматуры повышенной долговечности, прочности и жесткости, что обеспечивает снижение их веса и экономичное использование материалов.

Ил. 3. Библиогр. 2 назв.

УДК 621.771

Пути повышения производительности непрерывных травильных агрегатов ЛПЦ-5 / Савельева Р.Н., Савельев В.Б. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 55–58.

Предложены варианты повышения производительности НТА ЛПЦ-5 за счёт совершенствования технологии или реконструкции оборудования. Внедрение этих предложений позволит поэтапно повысить производительность НТА ЛПЦ-5, полностью обеспечить подкатом прокатные станы ОАО «ММК» и увеличить отгрузку травленого товарного металла.

Табл. 5.

УДК 621.771

Влияние вязкости минеральных масел на температурный режим подшипниковых узлов рабочих валков прокатных станов Жиркин Ю.В., Мироненков Е.И., Резванов С.Б., Дудоров Е.А. / Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 58–60.

На экспериментальной установке получили зависимости температурного режима подшипниковых узлов прокатных станов от вязкости используемого смазочного материала.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 4 назв.

УДК 669.1.002.5 – 192

Теоретическое обоснование повышения срока службы подшипниковых узлов роликов первой секции МНЛЗ / Анцупов В.П., Калиниченко С.Н., Анцупов А.В., Завьялов В.И., Подосян А.А. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 60–63.

В работе обоснованы рациональные режимы щеточной обработки поверхностей цапф осей роликов МНЛЗ, обеспечивающие уровень ее шероховатости, позволяющий повысить ресурс работы уплотнения в 1,09–1,46 раз.

Ил. 3. Библиогр. 5 назв.

УДК 669.1.002.5-192

Трибодиагностика серийного волочильного инструмента и оценка ресурса его работы / Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С., Артемьев А.В. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 63–65.

Предложен новый эксплуатационный показатель качества волочильного инструмента – «энергетическая» износостойкость, который не зависит от силовых и скоростных условий контактного фрикционного взаимодействия и является единой характеристикой волоки из данного материала – показателем качества волочильного инструмента второго уровня. С использованием нового показателя оценена износостойкость поверхности волочильного инструмента, определен класс и разряд его износостойкости, а также представлен алгоритм расчета ресурса работы волочильного инструмента.

Табл. 1. Библиогр. 6 назв.

УДК 669.1.002.5-192

Повышение качества волочильного инструмента технологическим обеспечением его выходных параметров / Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С., Мингазов И.Н. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 65–68.

На основе анализа НТД на серийный волочильный инструмент и типовой технологии его изготовления установлено, что нормативные документы на настоящий момент не являются руководящими, а качество волочильного инструмента неконтролируемым.

Произведен сравнительный анализ отечественной технологии производства волочильного инструмента с технологиями ведущих зарубежных фирм и показано, что относительный показатель её уровня  $q_i \ll 1$ . Для повышения качества волочильного инструмента разработана новая ВГД-АЭВ технология, которая по относительному показателю уровня технологии  $q_i$  превосходит зарубежные аналоги ( $q_{cp} \approx 1,31$ ), а для её реализации создан новый комплект нормативных документов.

Табл. 2. Библиогр. 6 назв.

УДК 669.1.002.5-192

Теоретические исследования влияния параметров процесса волочения на износ технологического инструмента / Анцупов В.П., Семенова О.В., Анцупов А.В., Быков А.С., Налимова М.В. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 68–70.

Представлены результаты теоретических исследований влияния технологических параметров процесса волочения на износ волочильного инструмента с различными выходными параметрами. Определена энергетическая интенсивность изнашивания волочильного инструмента, изготовленного по новой ВГД-АЭВ технологии, и показано увеличение износостойкости его рабочей поверхности по сравнению с серийным волочильным инструментом и волочильным инструментом с характеристиками, соответствующими современным требованиям по зарубежным источникам.

Ил. 1. Библиогр. 5 назв.

УДК 669.002.5

Моделирование процесса трещинообразования в поверхностном слое роликов МНЛЗ / Огарков Н.Н., Мазур Н.В. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 1. С. 70–74.

В работе предложен расчетный метод оценки размера зарождающихся трещин на поверхностях роликов МНЛЗ в процессе контактирования их с непрерывно-литой заготовкой. Полученные зависимости позволяют рассчитать размер зарождающихся микротрещин в поверхностном слое роликов МНЛЗ в зависимости от температуры непрерывно-литой заготовки, теплофизических и механических свойств материала поверхностного слоя роликов. Размер зарождающихся микротрещин меньше размеров зерен материала роликов, что способствует как внутриверенному, так и межверенному механизму распространения трещин.

Ил. 1. Библиогр. 4 назв.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Анцупов Александр Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Анцупов Алексей Викторович** – аспирант кафедры процессов и машин обработки давлением и сварочного производства ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Анцупов Виктор Петрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Артемьев Артем Валерьевич** – студент гр. КМ-01-1 ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Баскакова Надежда Тимофеевна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и финансов предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Белан Анатолий Кириллович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Белан Ольга Анатольевна** – кандидат технических наук, инженер ООО «Управляющая компания «ММК-МЕТИЗ», г. Магнитогорск.

**Белевская Елена Леонидовна** – аспирант кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Беляев Александр Иванович** – кандидат технических наук, исполняющий обязанности доцента кафедры процессов и машин обработки металлов давлением и сварочного производства ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Быков Александр Сергеевич** – аспирант кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Васильева Надежда Фёдоровна** – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и финансов предприятий ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Вдовин Константин Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии черных металлов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Данченко Екатерина Анясовна** – аспирант кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Дудоров Евгений Александрович** – студент гр. КМ-01-1 ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Жиркин Юрий Васильевич** – кандидат технических наук, профессор кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Завьялов Виктор Иванович** – начальник ЦРМО-3 ЗАО «Механоремонтный комплекс» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Зайдес Семен Азикович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов ГОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет».



**Ибрагимов Фаниль Габдулович** – доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кадошников Владимир Иванович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кадошникова Ирина Дмитриевна** – доцент кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Калиниченко Сергей Николаевич** – аспирант кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кандауров Евгений Леонидович** – аспирант кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», ведущий инженер Управления стратегического планирования ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Кандауров Леонид Евсеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кашенко Филипп Данилович** – доктор технических наук, профессор кафедры процессов и машин обработки металлов давлением и сварочного производства ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Климова Лариса Генриховна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технической графики ГОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет».

**Коковихин Артем Валерьевич** – аспирант кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кудряшов Александр Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Куликов Сергей Владимирович** – старший преподаватель кафедры экономики, коммерции и налогообложения ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Куликова Екатерина Владимировна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кургузов Александр Сергеевич** – аспирант кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кургузов Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Кутлубаев Ильдар Мухаметович** – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Мазур Николай Викторович** – мастер вальце-токарного участка цеха изложниц ЗАО «Механоремонтный комплекс» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Макаров Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой подъемно-транспортных машин и роботов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Малышева Марина Сергеевна** – аспирант кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Мингазов Ильяс Нафыйкович** – студент гр. КМ-01-1 ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Мироненков Евгений Иванович** – аспирант кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», ведущий инженер УКМ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Москвин Владимир Михайлович** – доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Моторыгин Матвей Евгеньевич** – аспирант кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Налимова Марина Викторовна** – кандидат технических наук, и. о. доцента кафедры технологии машиностроения ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Огарков Николай Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Оншин Николай Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Паршин Владимир Гаврилович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Подосян Артур Арутюнович** – кандидат технических наук, начальник ЛСО ЗАО «Механоремонтный комплекс» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Пронькина С.А.** – кандидат технических наук, доцент ГОУ ВПО «Братский государственный университет».

**Резванов Сергей Борисович** – студент гр. КМ-01-1 ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Решетников Дмитрий Александрович** – аспирант кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Савельев Всеволод Борисович** – кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист отдела инвестиционных программ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Савельева Раиса Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Савочкина Любовь Викторовна** – ассистент кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Свистунова Екатерина Анатольевна** – ассистент кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Семенова Ольга Викторовна** – ведущий инженер технического управления ООО «Управляющая компания ММК–МЕТИЗ».

**Тютюряков Наиль Шаукаевич** – ассистент кафедры механического оборудования металлургических заводов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Усатая Татьяна Владимировна** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры прикладной механики, графики, проектирования технических и технологических комплексов ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

## ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ МЕХАНИКО-МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА

**1. ТЕХНОЛОГИЯ** лакирования гибким инструментом. Покрытия, нанесённые на изделия, имеют широкий спектр свойств, таких как антифрикционные, износостойкие, восстанавливающие, антикоррозионные, прирабочные, антисхватывающие, схватывающие, декоративные и др. В качестве материала покрытия применяются алюминий, медь, кадмий, цинк, олово, свинец, латунь, бронза, баббит, фторопласт и другие материалы. Технология позволяет наносить однослойные, многослойные и смешанные покрытия на наружные поверхности изделия плоской и круглой формы, на технологический инструмент, а также на длинномерные изделия. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии на стане 2500 горячей прокатки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» составил 115 млн руб.

Руководители разработки:

доц., канд. техн. наук **В.И. Кадошников**;  
проф., д-р техн. наук, **Л.С. Белевский**;  
проф., д-р техн. наук **В.П. Анцупов**;  
доц., д-р техн. наук **С.И. Платов**.

**2. ТЕХНОЛОГИЯ и ОБОРУДОВАНИЕ** для изготовления металлических цилиндрических щёток позволяет производить инструмент, который может быть использован для очистки изделий от окалины, смазки, окисных плёнок, а также от других видов загрязнений. Кроме того щётки могут быть использованы для нанесения покрытий на изделия с целью придания им антифрикционных, износостойких, восстанавливающих, антикоррозионных, прирабочных, антисхватывающих, схватывающих, декоративных и др. свойств. Оборудование включает в себя: устройство для намотки ворса щётки на оправку; устройство для обвязки ворса; устройство для обрезки ворса; устройство для сборки щётки. Участок для реализации данной технологии занимает площадь 30 м<sup>2</sup>. Количество рабочих-3 человека. Производительность 2 щётки/ час (при диаметре щётки Ø 350 мм) при цене щётки 300-400 руб/шт.

Руководители разработки:

доц., канд. техн. наук **В.И. Кадошников**;  
проф., д-р техн. наук **Л.С. Белевский**;  
проф., д-р техн. наук **В.П. Анцупов**;  
доц., д-р техн. наук **С.И. Платов**.

**3. УСТАНОВКА** для нанесения покрытий на наружные поверхности изделия плоской формы. Установка базируется на плоскошлифовальном станке, на выходном валу которого вместо шлифовального круга устанавливается металлическая щётка, а на защитном кожухе монтируется устройство для подачи материала покрытия. Установка применяется для придания антифрикционных, износостойких, восстанавливающих, антикоррозионных, прирабочных, антисхватывающих, схватывающих, декоративных и др. свойств изделиям плоской формы. При этом работоспособность обработанных изделий увеличивается в 1,5 – 20 раз.

Руководители разработки:

доц., канд. техн. наук **В.И. Кадошников**;  
проф., д-р техн. наук **Л.С. Белевский**;  
проф., д-р техн. наук **В.П. Анцупов**;  
доц., д-р техн. наук **С.И. Платов**.

**4. УСТАНОВКА** для нанесения покрытий на наружные поверхности изделия круглой формы. Установка базируется на круглошлифовальном станке, на выходном валу которого вместо шлифовального круга устанавливается металлическая щётка, а на защитном кожухе монтируется устройство для подачи материала покрытия. Установка применяется для придания антифрикционных, износостойких, восстанавливающих, антикоррозионных, прирабочных, антисхватывающих, схватывающих, декоративных и др. свойств изделиям круглой формы. При этом работоспособность обработанных изделий увеличивается в 1,5–20 раз.

Руководители разработки:

доц., канд. техн. наук **В.И. Кадошников**;  
проф., д-р техн. наук **Л.С. Белевский**;  
проф., д-р техн. наук **В.П. Анцупов**;  
доц., д-р техн. наук **С.И. Платов**.

**5. ТЕХНОЛОГИЯ** изготовления спиральных резьбовых вставок, а также различных уплотнительных колец позволяет изготавливать вставки и уплотнительные кольца с высокими механическими, антифрикционными свойствами. Вставки могут быть применимы при ремонте резьбовых отверстий и для повышения несущей способности соединений, а кольца – для уплотнения различных подвижных соединений, работающих в экстремальных условиях. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии на ЗАО «Ремонтно-механический комплекс» ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» составил 300 тыс. руб. на одну установку изготовления спиральных резьбовых вставок и уплотнительных колец.

Руководители разработки:

доц., канд. техн. наук **С.А. Кургузов**;  
доц., канд. техн. наук **В.И. Кадошников**.

**6. ТЕХНОЛОГИЯ** строчного обкатывания и выглаживания длинномерных цилиндрических, плоских и фасонных изделий предназначенная для формирования требуемых показателей качества поверхности: шероховатости, наклёпа и остаточных напряжений. Позволяет повысить усталостную прочность в 1,5–2 раза, износостойкость, коррозионную стойкость и др. показатели для соответствующих изделий.

Руководители разработки:

доц., канд. техн. наук **С.А. Кургузов**;  
доц., канд. техн. наук **В.И. Кадошников**.

**7. КОНСТРУКЦИЯ** валков арматуры для бескалливой прокатки сортовых профилей. Валковая арматура позволяет значительно снизить износ инструмента за счет изменения толщины носовой части линеек, что способствует интенсивному охлаждению их рабочих поверхностей.

Преимуществами валковой арматуры являются повышение удерживающей способности и качества сортового проката, а также простота изготовления и использования.

Данная валковая арматура прошла полупромышленные испытания, которые подтвердили ее технические преимущества. Экономический эффект от применения технологии на стане 150 ОАО «Белорецкий металлургический комбинат» составил в 2004 г. 7 млн руб.

Руководитель разработки –

доц., д-р техн. наук **Л.Е. Кандауров**.

**8. ТЕХНОЛОГИЯ** и оборудование для обработки поверхностей дробью, позволяющая: очищать поверхности деталей от окалины и окисной плёнки перед нанесением покрытий; устранять на поверхности изделий микрорельефы, полученные на предыдущих пределах или операциях; формировать квазирегулярный микрорельеф на обработанной поверхности шероховатостью 0,6–10 мкм; получать упрочнённый слой на поверхности металлических изделий глубиной до 0,8 мм с остаточными напряжениями сжатия до 400 МПа. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии в листопрокатном цехе № 4 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» составляет 10,55 млн руб. (при обработке 10 тыс. т листа).

Руководители разработки:

доц., канд. техн. наук **С.И. Платов**;  
проф., д-р техн. наук, **Н.Н. Огарков**.

**9. КОМПЛЕКС** для обвязки бунтов проволоки и сортового проката большой массы обвязочной проволокой, обеспечивающего обвязку в технологической линии готовой продукции проволочных и сортовых станов. Параметры обвязываемого сечения ширина 200–400 мм, высота 800–2500 мм. Диаметр обвязочной проволоки 5–7 мм. Время обвязки сечения 250×2000 составляет 24 с. Технология формирования узла обеспечивает его повышенную нагрузочную способность. Стоимость комплекта оборудования 300 тыс. руб. Проведены промышленные испытания на стане 150 ОАО «Белорецкий металлургический комбинат».

Руководители разработки:

доц., д-р техн. наук **И.М. Кутлубаев**;  
проф., д-р техн. наук **А.Н. Макаров**.

**10. ТЕХНОЛОГИЯ** получения высококачественной продукции путем совместной холодной прокатки полосового металла и лент, проволоки, в том числе биметаллических полос с частичным плакированием. Технология включает контроль формы в технологической линии процессов производства и отделки продукции. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии на стане 2000 горячей прокатки составляет 1 млн руб.

Руководитель разработки –

проф., д-р техн. наук **П.И. Денисов**.

**11. КОНСТРУКЦИИ** роликовых волок бесстанинного типа и технологические процессы волочения фасонных профилей из чёрных, цветных металлов и сплавов, а также труднодеформируемых материалов. По сравнению с роликовыми волоками других конструкций, роликовые волокна бесстанинного типа отличаются меньшими габаритами и массой, при этом обладают более высокими характеристиками жёсткости. Применение роликовых волок вместо монолитных или в сочетании с ними позволяет повысить производительность процесса волочения, снизить энергетические затраты и получать профили с требуемой точностью геометрических размеров. Разработаны роликовые волокна и технологии получения профилей следующих поперечных сечений: квадратного, трапециевидного, тrefового, шестигранного, холоднодеформированной арматуры для железобетонных изделий и др. Технологии опробованы и частично внедрены в условиях ОАО "Омутнинский метизный завод", УК "ММК-Метиз". Экономический эффект от внедрения в калибровочном цехе УК "ММК-Метиз" технологии производства калиброванного шестигранного проката в роликовых волокнах в 2004 г. составил 5,6 млн. руб.

Руководитель разработки –

доц., канд. техн. наук **В.С. Славин**