

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.787.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-51-61



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУМОВ БАРКГАУЗЕНА ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния основных технологических параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования (ППД) на величину сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей. Для реализации предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки разработано устройство, обеспечивающее реверсивное круговое движение рабочего инструмента. С использованием эффекта шумов Баркгаузена определена величина сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали. Экспериментальные исследования показали, что величина сжимающих остаточных напряжений при реверсивном ППД изменяется в пределах от 210 до 345 МПа и зависит от основных технологических параметров процесса. Среди основных технологических параметров реверсивного ППД величина радиального натяга и реверсивная частота вращения рабочего инструмента оказывают наибольшее влияние на величину сжимающих остаточных напряжений. Увеличение радиального натяга, реверсивной частоты вращения рабочего инструмента и снижение величины продольной подачи приводят к весьма существенному росту сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали ($\sigma^{\text{ост}} \sim 342\text{-}345$ МПа). Установлено, что разница между экспериментальными и расчетными результатами не превышает 20%. По результатам экспериментальных исследований с помощью компьютерной программы Microsoft Visual Studio 2012 с языком программирования Python были определены оптимальные режимы упрочнения, обеспечивающие получение максимальных сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали: продольная подача – 0,07-0,10 мм/об; частота вращения заготовки – 280-300 об/мин; величина радиального натяга – 0,25-0,28 мм; реверсивная частота вращения рабочего инструмента – 250-300 дв. ход/мин; начальный угол установки рабочего инструмента – 90° и величина угла реверсивного вращения рабочего инструмента $\pm 55\text{-}\pm 60^\circ$.

Ключевые слова: реверсивное поверхностное пластическое деформирование, сжимающие остаточные напряжения, двухрадиусный ролик, реверсивная частота вращения, шумы Баркгаузена

© Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай, 2023

Для цитирования

Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Определение остаточных напряжений с использованием шумов Баркгаузена при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 51-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-51-61>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY USING BARKHAUSEN NOISE IN THE REVERSE SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents the results of experimental studies conducted to determine the effect of the main technological parameters of reverse surface plastic deformation (SPD) on compressive residual stresses on the surface of parts. To implement the proposed method of finishing and hardening processing, a device has been developed providing a reverse circular movement of the working tool. Using the Barkhausen effect, we determined the value of compressive residual stresses on the surface of parts. Experimental studies have shown that the value of compressive residual stresses during reverse SPD varies from 210 to 345 MPa and depends on the main technological parameters of the process. A radial interference fit and reverse rotational velocity of the working tool have the greatest influence on compressive residual stresses among the main technological parameters of the reverse SPD. An increase in the radial interference fit, reverse rotational velocity of the working tool and a decrease in longitudinal feed leads to a very significant increase in compressive residual stresses on the surface of the part ($\sigma^{\text{res}} \sim 342\text{-}345$ MPa). It has been established that the difference between the experimental and calculated results does not exceed 20%. According to the experimental studies performed using the Microsoft Visual Studio 2012 computer program with the Python programming language, the optimal hardening modes were determined to ensure maximum compressive residual stresses on the surface of the part: longitudinal feed was 0.07-0.10 mm/rev; rotational velocity of the workpiece was 280-300 rpm; the radial interference fit was 0.25-0.28 mm; reverse rotational velocity of working tool was 250-300 double stroke/min; the initial angle of installation of the working tool was 90° and the angle of reverse rotation of the working tool was $\pm 55^\circ - \pm 60^\circ$.

Keywords: reverse surface plastic deformation, compressive residual stresses, two-radius roller, reverse rotational velocity, Barkhausen noise

For citation

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Determination of Residual Stresses by Using Barkhausen Noise in the Reverse Surface Plastic Deformation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 51-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-51-61>

Введение

Повышение качества и надежности технических изделий – одна из центральных задач современного машиностроения. Согласно экспертным оценкам, уменьшение расходов по эксплуатации изделий даже на 3-5% оправдывает увеличение затрат по повышению их качества на 15-20% [1, 2].

Для повышения качества поверхностного слоя деталей машин обычно используют финишные и отделочно-упрочняющие методы обработки, в том числе поверхностное пластическое деформирование (ППД) [1-3]. По результату воздействия на заготовку процессы ППД примерно равноценны и предназначены для создания благоприятного микрорельефа обработанной поверхности, уточнения размеров и формы изделий, формирования тонкого упрочнения слоя и наведения в нем сжимающих остаточных напряжений [4, 5]. При решении вопроса о качестве выпускаемой продукции немаловажное значение имеют остаточные напряжения, которые

возникают практически при всех технологических операциях и оказывают существенное влияние на работоспособность деталей машин и элементов конструкций. В работах [2, 4, 6] установлено, что при известных способах ППД в поверхностных слоях деталей машин образуются сжимающие остаточные напряжения, которые оказывают положительное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. Сжимающие напряжения в поверхностных слоях металлоизделий могут полностью свести к нулю отрицательное действие выточек, отверстий, выступов, трещин, дефектов и других концентраторов напряжений.

При механической обработке традиционными способами ППД маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей возникают проблемы по сохранению их формы и размеров, так как при упрочнении таких деталей поверхностным пластическим деформированием невозможно получить стабильное качество по длине обработки – это касается и твердости, и шероховато-

сти, и остаточных напряжений. Если снизить величину радиальной нагрузки, то есть уменьшить величину радиального натяга рабочего инструмента, то не удастся обеспечить заданные показатели качества поверхностного слоя деталей машин. В этой связи возникает задача по интенсификации напряженного состояния в очаге упругопластической деформации процесса ППД без увеличения радиального натяга. Поиск способа повышения интенсивности напряжений в очаге деформации является актуальной задачей, которая позволит решить ряд проблем при упрочнении деталей малой жесткости. Один из путей повышения прочностных характеристик мало жестких цилиндрических деталей заключается в разработке упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения [7, 8]. Для решения поставленной задачи в Иркутском национальном исследовательском техническом университете ведутся работы по созданию новых способов ППД [9, 10]. Одним из них является процесс, основанный на реверсивном круговом движении рабочего инструмента (РИ) [11].

Цель данной работы заключается в экспериментальном определении влияния параметров и режимов реверсивного ППД на величину сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, что позволит оценить возможности предлагаемого способа по обеспечению качества деталей машин.

Материалы и методы исследования

Способ реверсивного поверхностного пластического деформирования. Схема реверсивного ППД цилиндрической заготовки представлена на рис. 1, где показана конструкция деформирующего элемента и схема упрочнения цилиндрической заготовки по предложенному способу.

Особенность данного способа заключается в том, что деформирующий элемент выполнен в виде двухрадиусного ролика, вершины которого располагаются относительно друг друга на некотором расстоянии l , при этом ось вращения деформирующего элемента расположена параллельно оси заготовки, а рабочему инструменту сообщают реверсивное вращение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два ролика деформирующего элемента и перпендикулярную оси заготовки, с круговой амплитудой угла α_p (см. рис. 1).

Как видно из схемы обработки (см. рис. 1) параметрами режима, определяющими кинематику процесса, являются: продольная подача РИ ($S_{пр}$), частота вращения заготовки (n_z), радиальный натяг (t), начальный угол установки РИ ($\alpha_{н}$), амплитуда угла реверсивного вращения РИ (α_p) и реверсивная частота вращения РИ (n_p). Заготовку 3 закрепляют в трехкулачковом патроне 1 токарно-винторезного станка и поджимают вращающимся центром задней бабки 2. Заготовке придают вращательное движение с частотой n_z , об/мин. Рабочему инструменту 4 одновременно сообщают продольную подачу $S_{пр}$ и реверсивное вращение n_p относительно оси r .

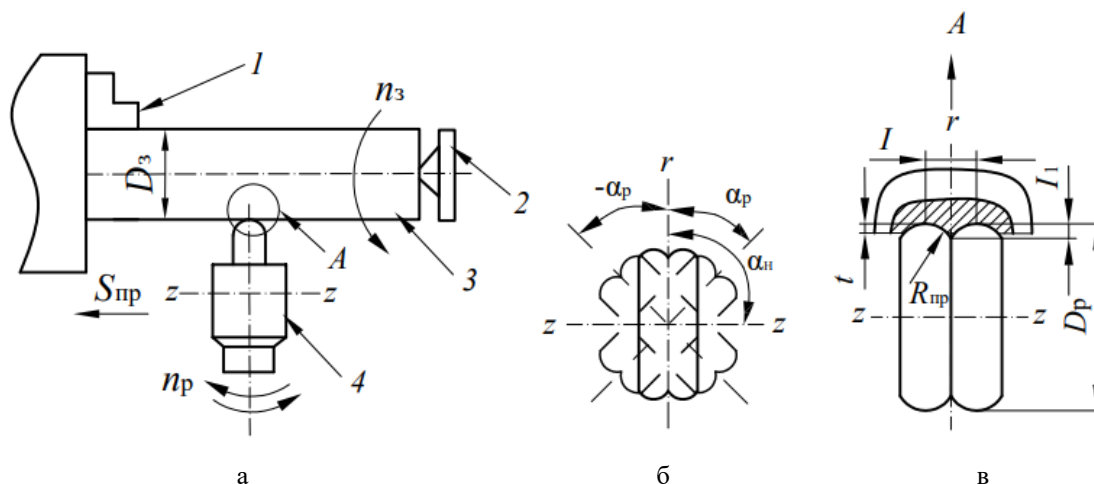


Рис. 1. Схемы реверсивного ППД двухрадиусным роликом (а), его реверсивного вращения (б) и рабочей зоны (в) [12]: 1 – трехкулачковый патрон; 2 – задняя бабка; 3 – заготовка; 4 – рабочий инструмент
Fig. 1. Diagrams of reverse SPD with a two-radius roller (a), its reverse rotation (б) and working zone (в) [12]: 1 is a three-jaw chuck; 2 is a tailstock; 3 is a workpiece; 4 is a working tool

Методика и техника выполнения эксперимента. Для определения остаточных напряжений на поверхности цилиндрических деталей при реверсивном ППД использовали цилиндрические образцы диаметром 30 мм из среднеуглеродистой стали 45. Опытные образцы разделены поперечными канавками на 6 одинаковых участков по длине и диаметру, которые упрочняли с использованием разных технологических параметров и режимов обработки. На каждом образце испытывался один параметр ППД с пятью разными режимами упрочнения, что позволяло построить соответствующие графики.

Для исключения биения обрабатываемой поверхности образец закрепляли в трехкулачковом патроне токарного станка и поджимали задним центром. После этого цилиндрическую поверхность образца диаметром 30 мм протачивали проходным резцом до диаметра 28 мм ($S_{пр} = 0,2$ мм/об, $n_3 = 600$ об/мин, $t = 0,2$ мм), а затем упрочняли реверсивным ППД.

Для реализации предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки авторами статьи разработано устройство для образования реверсивного кругового движения рабочего инструмента. Устройство работает на основе использования шагового электродвигателя, реверсивное движение которого задается управляющей программой, запрограммированной на персональном компьютере [12].

Экспериментальные исследования проведены на токарном станке 1К62, где вместо верхней части суппорта устанавливается устройство для создания реверсивного кругового движения двухрадиусного ролика. Геометрические характеристики рабочего инструмента: диаметр рабочего ролика $D_p = 30$ мм, профильный радиус $r_{пр} = 2,5$ мм, расстояние между вершинами рабочего ролика $l = 1,5$ мм, материал – твердый сплав ВК-8. В качестве технологической смазки использовано индустриальное масло И-40А, которое широко применяется при обработке деталей ППД [13].

Методика измерения остаточных напряжений. Для измерения остаточных напряжений на поверхности упрочненных деталей использован метод на основе шумов Баркгаузена [14, 15]. Применение данного метода обусловлено построением корреляционной связи между амплитудой шумов Баркгаузена (магнитоупругим параметром) и остаточными напряжениями в исследуемых металлах и сплавах. В общем случае шумы Баркгаузена понижаются при повышении твердости и остаточных сжимающих напряжений и увеличиваются при наличии растягивающих напряжений [14].

Эксперименты выполнены на упрочненных

цилиндрических образцах из стали 45, которая является сталью ферромагнитного класса, хорошо отражающей эффект шумов Баркгаузена при воздействии магнитного поля. Измерения проводили с помощью цифрового анализатора шумов Баркгаузена Rollscan 300 (рис. 2). Оптимальная частота намагничивания по развертке составляет $f = 150$ Гц, а оптимальное напряжение намагничивания $U = 1,1$ В.

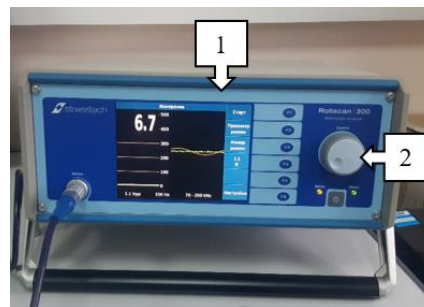


Рис. 2. Цифровой анализатор шумов Баркгаузена Rollscan 300: 1 – информационный экран; 2 – регулятор параметром шумов

Fig. 2. Rollscan 300, a digital Barkhausen noise analyzer: 1 is an information screen; 2 is a noise parameter regulator

Для определения корреляционной зависимости между шумами Баркгаузена и остаточными напряжениями проведены предварительные исследования напряженного состояния плоских образцов с размерами $1,8 \times 11 \times 140$ мм, изготовленных тоже из стали 45 (рис. 3, а).

Предварительные опыты на плоских образцах проводили в следующей последовательности: для первой пластины – сводили ее края навстречу друг другу вверх для создания сжимающих напряжений на верхней поверхности пластины; затем вторую пластину прогибали в обратном направлении для создания растягивающих напряжений на верхней поверхности, при этом одновременно регистрировали стрелу прогиба индикатором с двухопорной планкой на базе $b = 64$ мм (рис. 3, б). Увеличение стрелы прогиба на образец осуществляли с шагом 100 мкм. По значению стрелы прогиба вычисляли радиус изгиба пластины, по которому с учетом модуля упругости (для стали 45 $E = 2 \cdot 10^5$ МПа) определяли создаваемые напряжения на каждом образце. Параллельно процессу создания напряжений на пластинах измеряли соответствующие значения магнитоупругого параметра МП (амплитуды шумов) (рис. 3, в). Замеры стрелы прогиба пластин и расчет напряжений вычисляли по следующим формулам:

$$\sigma = E\epsilon \frac{1}{\rho_k}; \quad \rho_k = \frac{b^2}{8f_c}; \quad y = \frac{S_j}{2}, \quad (1)$$

где f_c – прогиб пластины на базе b ; E – модуль упругости (для стали 45 $E = 2 \cdot 10^5$ МПа); ρ_k – кривизна пластины; y – расстояние между нейтральными линиями поперечного сечения и поверхностью пластины; S_j – толщина пластины.

В результате численных расчетов по формулам (1) и результатов измерения построена корреляционная зависимость магнитоупругого параметра от максимальных напряжений при изгибе пластин (рис. 4).

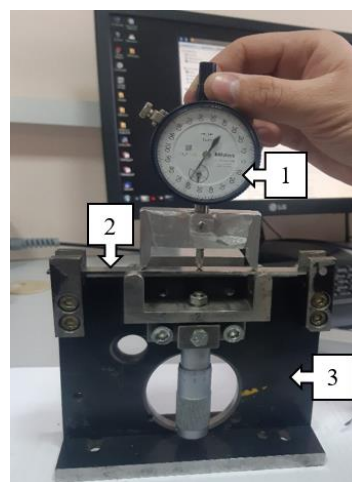
Анализируя рис. 4, можно сделать вывод о том, что для стали 45 сжимающие напряжения

соответствуют малым значениям МП (ниже 64-65 МП), а при значении МП свыше 65 единиц создаются растягивающие напряжения. На участках возрастания сжимающих и снижением растягивающих напряжений наблюдается уменьшение шумов.

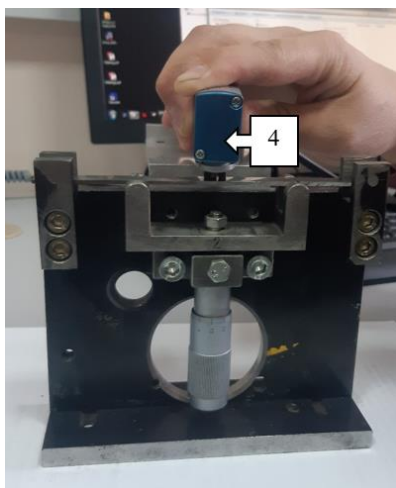
На каждом цилиндрическом участке измерение МП проводили непосредственно в 8-ми контрольных точках, расположенных на поверхности по двум окружностям (рис. 3, г) и с использованием графика на рис. 4 вычисляли напряжения на поверхности деталей, упрочненным реверсивным ППД.



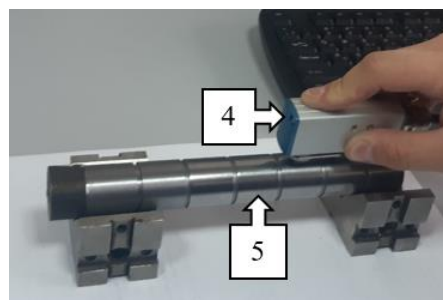
а



б



в



г

Рис. 3. Измерение остаточных напряжений на основе шумов Баркгаузена: а – контрольные образцы-пластины; б – измерение деформации пластины; в – измерение шумов Баркгаузена на плоских пластинах; г – измерение шумов Баркгаузена на цилиндрических образцах; 1 – индикатор для измерения стрелы прогиба; 2 – пластина; 3 – станок для изгиба пластины; 4 – датчик шумов Баркгаузена; 5 – цилиндрический образец

Fig. 3. Measurement of residual stresses based on Barkhausen noise: а are reference samples-plates; б is measurement of plate deformation; в is measurement of Barkhausen noise on flat plates; г is measurement of Barkhausen noise on cylindrical samples; 1 is an indicator for measuring the camber; 2 is a plate; 3 is a machine for bending the plate; 4 is a Barkhausen noise sensor; 5 is a cylindrical sample

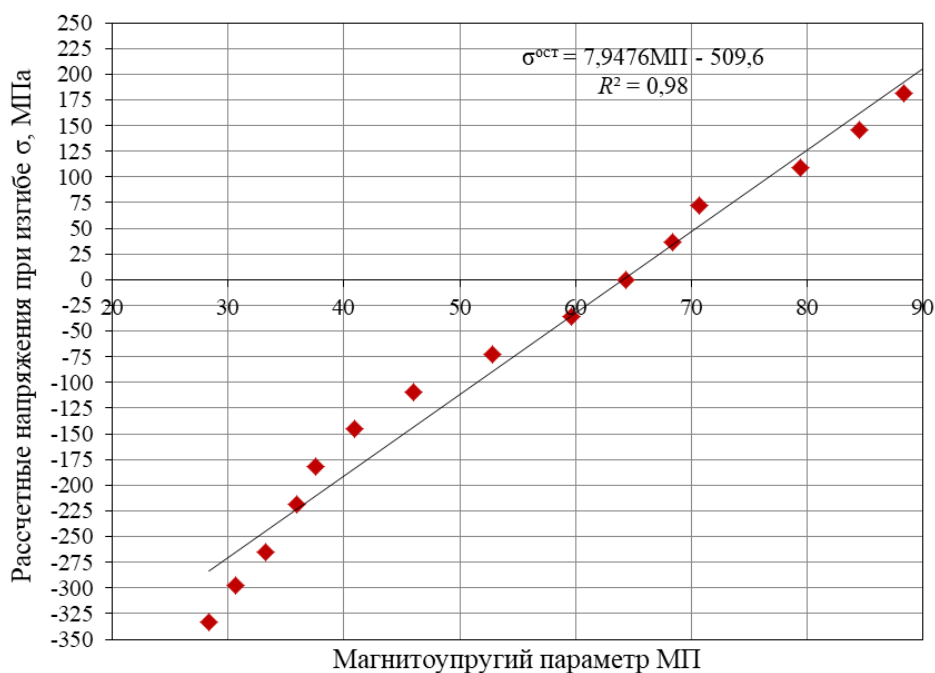


Рис. 4. Корреляционная зависимость остаточных напряжений от амплитуды шума в пластинах из стали 45
 Fig. 4. Correlation dependence between residual stresses and noise amplitude in the steel 45 plates

Результаты экспериментальных исследований

Базовые режимы обработки, которые были установлены в результате предварительного упрочнения реверсивным ППД, представлены в работе [12]. Значения шумов Баркгаузена и остаточных напряжения до и после реверсивного ППД (при базовых режимах упрочнения) представлены в таблице.

Из таблицы видно, что на поверхности исходного образца после механической обработки резанием создаются небольшие растягивающие напряжения величиной 10,2 МПа, а после реверсивного ППД (при базовых режимах упрочнения) на поверхности деталей растягивающие напряжения переходят в сжимающие, значения которых достигают около 310 МПа.

Таблица. Значения шумов Баркгаузена и остаточных напряжений
 Table. Barkhausen noise and residual stresses

Параметры измеряемых величин	Исходный образец (неупрочненный)	Упрочненный образец (базовые режимы)
Величина магнитоупругих параметров (МП)	65,4	25,1
Величина остаточных напряжений, МПа	+10,2	-310,2

Для сопоставления экспериментальных результатов определения остаточных напряжений с использованием шумов Баркгаузена с расчетными результатами, полученными при конечно-элементном моделировании [16], использовали интенсивность напряжений, которая оценивает сложное напряженное состояние следующей формулой [17, 18]:

$$\sigma_i^{ост} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\left(\sigma_z^{ост} - \sigma_\phi^{ост} \right)^2 + \left(\sigma_\phi^{ост} - \sigma_r^{ост} \right)^2 + \left(\sigma_r^{ост} - \sigma_z^{ост} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

где $\sigma_z^{ост}$, $\sigma_r^{ост}$, $\sigma_\phi^{ост}$ – компоненты остаточных напряжений, действующих по осям Oz, Or, Oφ (см. рис. 1).

Рассмотрим степень влияния каждого технологического параметра реверсивного ППД на величину сжимающих остаточных напряжений на поверхности цилиндрических образцов.

Влияние основных параметров реверсивного ППД. На рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов от основных параметров реверсивного ППД (продольной подачи $S_{пр}$, частоты вращения заготовки n_z и радиального натяга t).

Из рис. 5 следует, что экспериментальные значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов увеличиваются при уменьшении продольной подачи и увеличении частоты вращения заготовки и величины радиального натяга. Уменьшение продольной подачи от 0,28 до 0,07 мм/об, увеличение частоты вращения заготовки от 60 до 300 об/мин и величины радиального натяга от 0,07 до 0,28 мм приводят к увеличению сжимающих остаточных напряжений на 16,6, 14,7 и 10,2% соответственно. Следует отметить, что полученные экспериментальные результаты по сравнению с расчетными показали

удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений сжимающих остаточных напряжений в зависимости от основных параметров реверсивного ППД. При этом разница между экспериментальными результатами и расчетными варьируется в пределах от 3 до 19%.

Влияние реверсивных параметров упрочнения. На рис. 6 представлены графики, показывающие экспериментальные и расчетные значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов в зависимости от начального угла установки РИ (α_n), амплитуды угла (α_p) и реверсивной частоты вращения РИ (n_p) при реверсивном ППД.

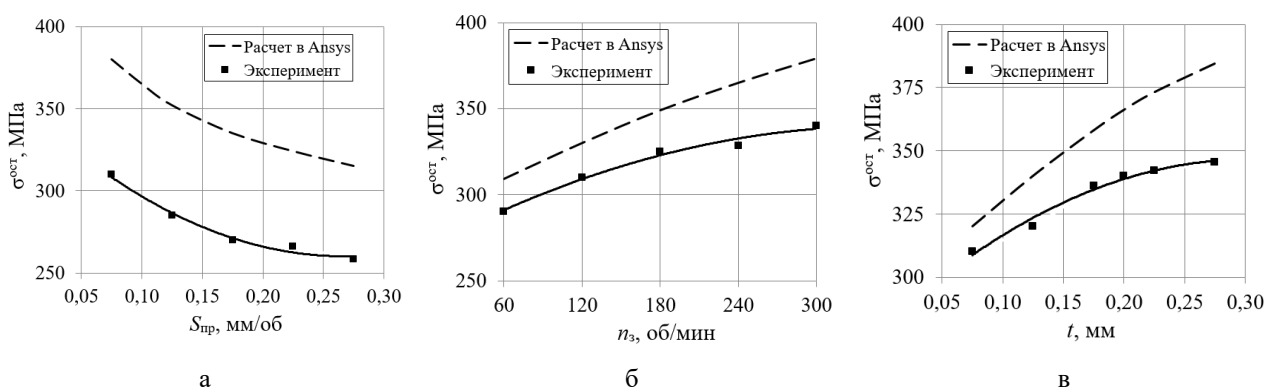


Рис. 5. Зависимость сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов от основных параметров реверсивного ППД: а – продольной подачи $S_{пр}$; б – частоты вращения заготовки $n_з$; в – величины радиального натяга t

Fig. 5. Dependence between compressive residual stresses on the surface of the samples and the main parameters of reverse SPD: а is longitudinal feed (S_{long}); б is rotational velocity of the workpiece ($n_{workpiece}$); в is a radial interference fit (t)

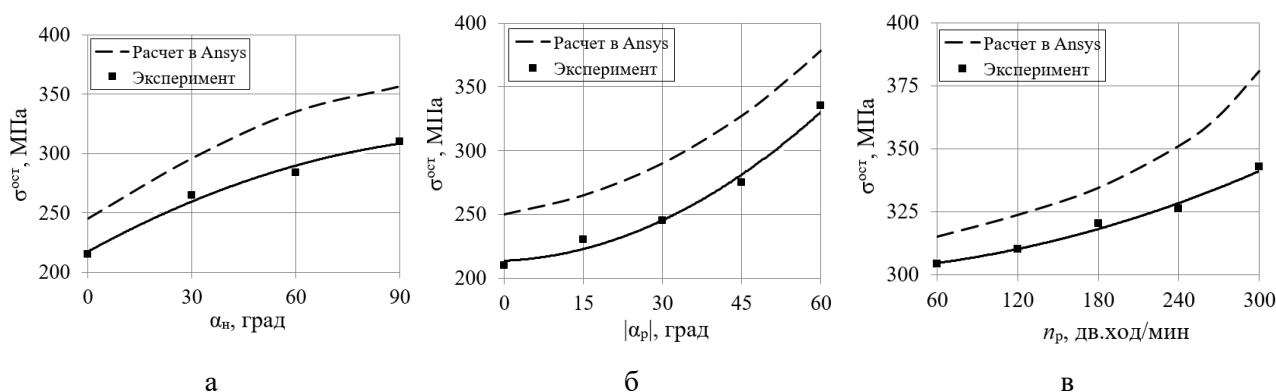


Рис. 6. Зависимость сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов при реверсивном ППД от: а – начального угла установки РИ; б – амплитуды угла и реверсивного вращения РИ; в – реверсивной частоты вращения РИ

Fig. 6. Dependence between compressive residual stresses on the surface of the samples during reverse SPD and: а is the initial angle of installation of the working tool; б are amplitudes of the angle and reverse rotation of the working tool; в is reverse rotational velocity of the working tool

По рис. 6 можно отметить, что с увеличением начального угла установки РИ от 0 до 90°, амплитуды угла реверсивного вращения РИ от 0 до 60° и реверсивной частоты вращения РИ от 60 до 300 дв. ход/мин экспериментальные значения сжимающих остаточных напряжений увеличиваются на 30,5, 37,3 и 11,2%, соответственно. Установлено, что характер изменения сжимающих остаточных напряжений в зависимости от реверсивных параметров упрочнения, полученный при экспериментальном определении, практически согласуется с результатами, полученными при моделировании. При этом расхождение при сопоставлении результатов, полученных в результате численных расчетов при моделировании и при экспериментальном определении, не превышает 15%.

Для поиска оптимальных режимов реверсивного ППД, обеспечивающих получение максимальных сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей, использовали компьютерную программу Microsoft Visual Studio 2012 с языком программирования Python [19, 20], которая является одним из широко применяемых программ для решения задач статистического

характера в области машиностроения. Для обработки данных в компьютерной программе необходимо использовать однофакторные уравнения (3), полученные при описании экспериментальных кривых (см. рис. 5 и 6). При этом сжимающие остаточные напряжения на поверхности деталей при реверсивном ППД являются основным параметром оптимизации:

$$\sigma_{\text{ост}} = \begin{cases} 1303,3S_{\text{пр}}^2 - 696,45S_{\text{пр}} + 353,24 \\ -0,0006n_3^2 + 0,4024n_3 + 269,04 \\ -724,05t^2 + 439,9t + 279,86 \\ 0,0003n_p^2 + 0,0338n_p + 301,4 \\ 0,0295\alpha_p^2 + 0,172\alpha_p + 213,76 \\ -0,0066\alpha_H^2 + 1,6015\alpha_H + 217,38 \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 7 представлены результаты статистической обработки по определению оптимальных режимов упрочнения, обеспечивающих получение максимальных сжимающих остаточных напряжений при реверсивном ППД.

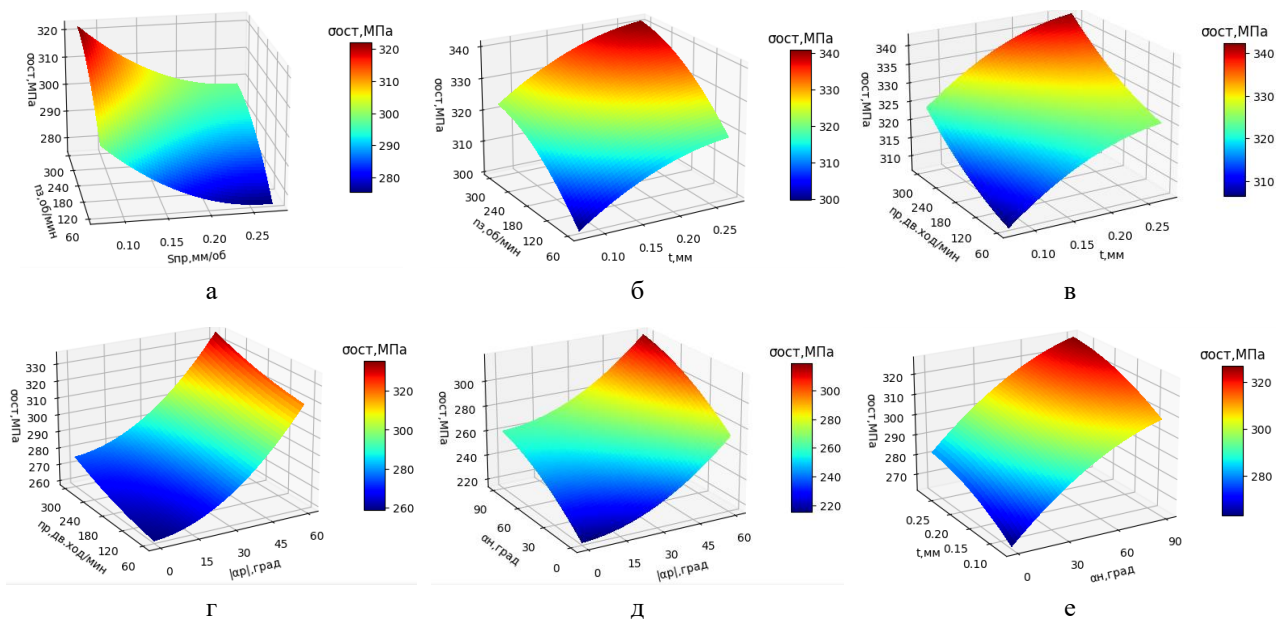


Рис. 7. Поверхности отклика сжимающих остаточных напряжений на поверхности цилиндрических деталей при реверсивном ППД в зависимости от: а – продольной подачи и частоты вращения заготовки; б – частоты вращения заготовки и величины радиального натяга; в – величины радиального натяга и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента; г – реверсивной частоты вращения и амплитуда угла реверса рабочего инструмента; д – амплитуды угла реверса и начального угла установки рабочего инструмента; е – величины радиального натяга и начального угла установки рабочего инструмента

Fig. 7. Response surfaces of compressive residual stresses on the surface of cylindrical parts during reverse SPD depending on: a is longitudinal feed and rotational velocity of the workpiece; б is rotational velocity of the workpiece and the radial interference fit; в are the radial interference fit and reverse rotational velocity of the working tool; г is reverse rotational velocity and amplitude of the reverse angle of the working tool; д are amplitudes of the reverse angle and the initial angle of installation of the working tool; е are the radial interference fit and the initial angle of installation of the working tool

В результате регрессионного анализа установлено, что максимальные сжимающие остаточные напряжения на поверхности детали (около 345 МПа) при реверсивном ППД достигаются при следующих значениях технологических параметров ППД: продольная подача – 0,07-0,10 мм/об; частота вращения заготовки – 280-300 об/мин; величина радиального натяга – 0,25-0,28 мм; реверсивная частота вращения РИ – 250-300 дв. ход/мин; начальный угол установки РИ – 90° и величина угла реверсивного вращения РИ – ±55±60°.

Таким образом, результаты экспериментального исследования доказывают эффективность способа реверсивного ППД по созданию сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое и его можно рекомендовать для проведения отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей.

Выводы

1. С использованием шумов Баркгаузена установлена связь между магнитоупругим параметром (МП) и механическими напряжениями для стали 45, которая описывается следующим выражением: $\sigma = 7,9476\text{МП} - 509,6$ (коэффициент достоверности $R^2 = 0,98$). Установлено, что сжимающие напряжения соответствуют малым значениям магнитоупругих параметров шумов (ниже 65 МП), а при значении МП свыше 53 единиц создаются растягивающие напряжения.

2. Экспериментальными результатами установлено, что после реверсивного ППД на поверхности детали формируются сжимающие остаточные напряжения, величина которых варьируется в интервалах 210-345 МПа в зависимости от выбранных режимов обработки. Среди основных технологических параметров реверсивного ППД величина радиального натяга и реверсивная частота вращения РИ оказывают наибольшее влияние на величину сжимающих остаточных напряжений. Увеличение радиального натяга, реверсивной частоты вращения РИ и снижение величины продольной подачи приводит к весьма существенному росту сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали ($\sigma^{\text{ост}} \sim 342\text{-}345$ МПа).

3. Полученные экспериментальные результаты по сравнению с расчетными показали удовлетворительное совпадение остаточных напряжений в зависимости от технологических параметров реверсивного ППД. При этом разница между экспериментальными и расчетными результатами не превышает 20%.

4. Определены оптимальные режимы упрочнения, обеспечивающие получение максимальных сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали: продольная подача – 0,07-0,10 мм/об; частота вращения заготовки – 280-300 об/мин; величина радиального натяга – 0,25-0,28 мм; реверсивная частота вращения РИ – 250-300 дв. ход/мин; начальный угол установки РИ – 90° и величина угла реверсивного вращения РИ – ±55±60°.

Список источников

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
3. Поверхностное пластическое деформирование как метод повышения качества деталей машин / Бутаков Б.И., Шебакин В.С., Марченко Д.Д., Артюх А.В. // Труды ГОСНИТИ. 2011. Т. 107. №2. С. 85-87.
4. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Влияние режимов на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при размерном совмещенном обкатывании // Обработка металлов. 2008. №2(39). С. 15-22.
5. Просвиркина Е.А., Саушкин М.Н. Исследование полей остаточных напряжений и пластических деформаций при поверхностном упрочнении цилиндрического образца с учетом организации процесса ППД // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2004. № 26. С. 194-195.
6. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования: монография / под ред. С.А. Зайдеса. Т. 2. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2022. 584 с.
7. Нгуен Тхань Ван, Нгуен Ван Хинь, Нгуен Хыу Хай. Влияние параметров тороидального ролика на геометрические характеристики отпечатков и давление в зоне контакта при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 6(45). С. 99-103.
8. Нго Као Кыонг. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании цилиндрических деталей // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2021. С. 16-26.
9. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 129-139.
10. Нго Као Кыонг. Исследование внеконтактных деформаций при локальном нагружении // Вестник

- науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1. №3. С. 6-13.
11. Пат. 2758713 Российская Федерация, МПК В24В39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай; заявка № 2021100553; заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021. Бюл. № 31.
 12. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на шероховатость упрочненных деталей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. №1. С. 120-130.
 13. Абрамов А.Н., Боткин А.В., Балышева Э.Г. Влияние физико-химических свойств смазочного материала на шероховатость поверхности деформируемой заготовки при волочении // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. №7. С. 313-316.
 14. Никитина Е.Н. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научно-технического развития. 2010. №4(32). С. 18-28.
 15. Иляхинский А.В., Родюшкин В.М., Никитина Е.А. Об оценке действующих напряжений акустическим методом при пластическом деформировании стали // Транспортные системы. 2018. №1(17). С. 52-56.
 16. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние начальной ориентации рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Технология металлов. 2022. №12. С. 11-20.
 17. Attila Kossa, László Szabó. Numerical implementation of a novel accurate stress integration scheme of the von Mises elastoplasticity model with combined linear hardening // Finite Elements in Analysis and Design. 2010, vol. 46, pp. 391-400. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.12.006>
 18. Strouboulisa T., Babuškab I., Dattaa D.K., Coppssa K., Gangaraja S.K. A posteriori estimation and adaptive control of the error in the quantity of interest. Part I: A posteriori estimation of the error in the von Mises stress and the stress intensity factor // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2000, vol. 181, pp. 261-294. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00077-8)
 19. Francesco Farina, Andrea Camisa, Andrea Testa, Ivano Notarnicola, Giuseppe Notarstefano. DISROPT: a Python Framework for Distributed Optimization // IFAC-PapersOnLine. 2020, vol. 53, pp. 2666-2671. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.382>
 20. Antonio Benítez-Hidalgo, Antonio J. Nebro, José García-Nieto, Izaskun Oregi, Javier Del Ser. jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics // Swarm and Evolutionary Computation. 2019, vol. 51, pp. 100598.

References

1. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.)
2. Smelyansky V.M. *Mekhanika uprochneniya detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 300 p. (In Russ.)
3. Butakov B.I., Shebanin V.S., Marchenko D.D., Artyukh A.V. Surface plastic deformation as a method for improving the quality of machine parts. *Trudy GOSNITI* [Proceedings of GOSNITI]. 2011;107(2):85-87. (In Russ.)
4. Blyumenshtein V.Yu., Makhlov M.S. Influence of modes on the formation of residual stresses in the surface layer during dimensional combined burnishing. *Obrabotka metallov* [Metal Working]. 2008;(2(39)):15-22. (In Russ.)
5. Prosvirkina E.A., Saushkin M.N. Research on the fields of residual stresses and plastic deformations during surface hardening of a cylindrical sample taking into account the organization of the surface plastic deformation process. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences]. 2004;(26):194-195. (In Russ.)
6. Zaides S.A. *Spravochnik po protsessam poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya: monografiya* [Handbook of surface plastic deformation processes: Monograph]. Vol. 2. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2022, 584 p. (In Russ.)
7. Nguyen Thanh Van, Nguyen Van Hinh, Nguyen Huu Hai. Influence of parameters of a toroidal roller on the geometric characteristics of prints and pressure in the contact zone during reverse surface plastic deformation. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Equipment and Technologies]. 2022;(6(45)):99-103. (In Russ.)
8. Ngo Cao Cuong. Intensification of the stress state in the deformation zone during surface plastic deformation of cylindrical parts. *Materialy XI Vserossiiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the 11th All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021, pp. 16-26. (In Russ.)
9. Zaides S.A. New methods of surface plastic deformation in manufacturing machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018;16(3):129-139. (In Russ.)
10. Ngo Cao Cuong. Study on non-contact deformations under local loading. *Vestnik nauki i obrazovaniya*

- Severo-Zapada Rossii* [Journal of Science and Education of the North-West of Russia]. 2015;1(3):6-13. (In Russ.)
11. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya naruzhnykh poverkhnostey tel vrashcheniya* [Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of revolution]. Patent RU, no. 2758713, 2021.
 12. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of parameters of reverse surface plastic deformation on roughness of hardened parts. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2023;19(1):120-130. (In Russ.)
 13. Abramov A.N., Botkin A.V., Balysheva E.G. Influence of physical and chemical properties of a lubricant on surface roughness of a deformable workpiece during drawing. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in Mechanical Engineering]. 2018;16(7):313-316. (In Russ.)
 14. Nikitina E.N. Advantages of the acoustoelasticity method for non-destructive testing of mechanical stresses in machine parts. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2010;(4(32)):18-28. (In Russ.)
 15. Ilyakhinsky A.V., Rodyushkin V.M., Nikitina E.A. On the assessment of acting stresses by the acoustic method during plastic deformation of steel. *Transportnye sistemy* [Transport Systems]. 2018;(1(17)):52-56. (In Russ.)
 16. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of the initial orientation of the working tool on the stress and strain state during reverse surface plastic deformation. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals]. 2022;(12):11-20. (In Russ.)
 17. Attila Kossa, László Szabó. Numerical implementation of a novel accurate stress integration scheme of the von Mises elastoplasticity model with combined linear hardening. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2010;46:391-400. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.12.006>
 18. Strouboulisa T., Babuškab I., Dattaa D.K., Coppas K., Gangaraja S.K.. A posteriori estimation and adaptive control of the error in the quantity of interest. Part I: A posteriori estimation of the error in the von Mises stress and the stress intensity factor. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000;181:261-294. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00077-8)
 19. Francesco Farina, Andrea Camisa, Andrea Testa, Ivano Notarnicola, Giuseppe Notarstefano. DISROPT: a Python framework for distributed optimization. *IFAC-PapersOnLine*. 2020;53:2666-2671. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.382>
 20. Antonio Benítez-Hidalgo, Antonio J. Nebro, José García-Nieto, Izaskun Oregi, Javier Del Ser. jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019;51:100598.

Поступила 08.06.2023; принята к публикации 03.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 08/06/2023; revised 03/07/2023; published 25/09/2023

Зайдес Семен Азикович – доктор технических наук, профессор,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

Нгуен Хью Хай – аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: nquan6799@gmail.com. ORCID 0000-0001-7909-385X

Semen A. Zaides – DrSc (Eng.), Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: zsa@istu.edu. ORCID: 0000-0001-9416-7749

Nguyen Huu Hai – postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: nquan6799@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7909-385X