



ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛИННОМЕРНЫХ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Кленько С.В.¹, Астащенко В.И.², Сафаров Д.Т.², Харисов И.Ж.¹, Орлянский В.Е.¹

¹ ПАО «Камский автомобильный завод», Набережные Челны, Россия

² Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи. Выполнен анализ стендовых испытаний балки передней оси грузового автомобиля КАМАЗ. Приведены показатели состава, структуры, твердости и циклической долговечности деталей, изготовленных из улучшаемой стали 45X. Исследовано влияние твердости и поверхностного наклепа дробью деталей на циклическую стойкость. Показана положительная роль наклепа деталей стальной дробью ДСЛУ-2.2 в части нейтрализации обезуглероженного слоя и других поверхностных дефектов. Установлено необходимое значение твердости металла основы детали для удовлетворительной обрабатываемости резанием поковок и достижения заданной стойкости балки передней оси при циклическом нагружении. Определено рациональное время дробеобработки и температурно-временные параметры термического улучшения поковок, которые обосновывают долговечность деталей на уровне 1 млн циклов и более. Технология поверхностного наклепа и термической обработки реализованы в производствах ПАО «КамАЗ» и рекомендуются к внедрению на предприятиях машиностроения и в других отраслях промышленности. Для определения степени поверхностного наклепа деталей дробью разработано и внедрено устройство, в котором размещены пластинки Альмена в наиболее ответственных местах изделия. **Цель работы.** Разработаны технологические решения по повышению циклической долговечности длинномерных стальных деталей машин. **Используемые методы.** Использованы металлографический анализ, статистические методы обработки экспериментальных данных. **Новизна.** Найдены оптимальные параметры дробенаклепа поверхностного слоя длинномерных деталей, обеспечивающие циклическую долговечность на уровне 1 млн циклов и более. **Результат.** Разработана технология упрочнения поверхностного слоя длинномерных деталей, повышающая их циклическую долговечность. **Практическая значимость.** Технология внедрена в производственный процесс изготовления длинномерных деталей на Кузнечном заводе ПАО «КамАЗ».

Ключевые слова: детали автомобиля, сталь, структура, твердость, поверхностный слой, дефекты металла, дробенаклеп, пластинка Альмена, циклическая долговечность, контроль качества

© Кленько С.В., Астащенко В.И., Сафаров Д.Т., Харисов И.Ж., Орлянский В.Е., 2024

Для цитирования

Повышение циклической долговечности длинномерных стальных деталей машин / Кленько С.В., Астащенко В.И., Сафаров Д.Т., Харисов И.Ж., Орлянский В.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 98-106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-98-106>



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

INCREASING CYCLIC DURABILITY OF LONG-LENGTH STEEL MACHINE PARTS

Klenko S.V.¹, Astashchenko V.I.², Safarov D.T.², Kharisov I.Zh.¹, Orlyansky V.E.¹

¹ PJSC Kama Automobile Plant, Naberezhnye Chelny, Russia

² Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The authors analyzed bench tests of a front axle beam of KAMAZ trucks. The paper presents values of the composition, structure, hardness and cyclic durability of parts made of heat-hardenable steel 45X, and describes the influence of hardness and surface shot blasting of parts on cyclic durability. A positive role of shot blasting of parts with DSLU-2.2 improved cast steel shots is shown in terms of removing the decarbonized layer and other surface defects. The authors determined the steel hardness value of the base of the part required to achieve satisfactory machinability by cutting forgings and specified resistance of the front axle beam under cyclic loading; and a reasonable period of shot blasting, and temperature/time parameters of thermal refining of forgings, providing a rationale for a durability of parts of 1 million cycles or more. The technology of surface shot blasting and heat treatment was applied at the production facilities of PJSC KAMAZ and recommended for their introduction at machine-building enterprises in other industries. To determine the degree of surface shot blasting of parts, the authors developed and introduced a device, containing Almen strips in the most critical points of the product. **Objective.** The study is aimed at developing technological solutions to improve cyclic durability of long-length steel machine parts. **Methods Applied.** The authors applied metallographic analysis and statistical methods of processing experimental data. **Originality.** The paper presents the determined optimal parameters of surface shot blasting of long-length parts, providing a cyclic durability of 1 million cycles or more. **Result.** The developed technology of surface hardening of long-length parts contributes to increasing their cyclic durability. **Practical Relevance.** The technology has been introduced into the process of manufacturing long-length parts at the Forging Plant of PJSC KAMAZ.

Keywords: car parts, steel, structure, hardness, surface layer, steel defects, shot blasting, Almen strip, cyclic durability, quality control

For citation

Klenko S.V., Astashchenko V.I., Safarov D.T., Kharisov I.Zh., Orlyansky V.E. Increasing Cyclic Durability of Long-Length Steel Machine Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 98-106. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-98-106>

Введение

В производственном цикле изготовления большинства деталей автомобиля используются разносторонние и хорошо изученные виды обработки: горячая пластическая деформация, правка и чеканка, термическая и механическая обработка, упрочняющие технологии, декоративные и антикоррозионные покрытия. Причем на отдельных деталях, и в первую очередь на длинномерных, имеются поверхности, которые не подвергаются механической и упрочняющей обработке. Примером такого изготовления деталей может служить балка передней оси грузового автомобиля КАМАЗ. Качество поверхности многих участков на этой детали наследованы от технологий кузнечного производства и, соответственно, на них присутствуют обезуглероженный слой, вмятины, складки металла, зажимы, заштампованная окалина и другие дефекты. В условиях эксплуатации поверхностей слой детали подвергается наиболее сильному воздействию – механическому, тепловому, коррози-

онному и т.д. Незначительные повреждения или дефекты строения поверхности служат очагами зарождения усталостных трещин, которые в итоге вызывают разрушение детали при ее циклическом нагружении. На **рис. 1** приведены примеры разрушения балок передней оси по причине заштампованной окалины (**рис. 1, а, б**) и складок материала по линии обрезки облоя (**рис. 1, в, г**).

Эффективными способами по нейтрализации таких дефектов служат технологии, направленные на обеспечение заданного изменения свойств поверхностного слоя. Для достижения этих целей в промышленности используют процессы химико-термической обработки, поверхностно-пластического деформирования и др. За счет использования качественного материала [1-3], придания чистоты поверхности [4-8], наличия сжимающих напряжений и заданных показателей физико-механических свойств в поверхностном слое [8-14] обосновывается высокая эксплуатационная надежность деталей при их циклическом и статическом нагружениях, износе, тепловом

воздействии и т.д. [15-18]. Однако следует заметить, что по отдельным деталям, особенно на поверхности которых одновременно присутствует разнообразие по чистоте, структуре и свойствам, необходимы специальные технические и технологические решения, направленные на достижение высоких показателей долговечности и надежности изделий. В литературе отсутствует информация о результативности применения дробенаклепа для повышения циклической долговечности длинномерных стальных деталей в массовом их производстве.

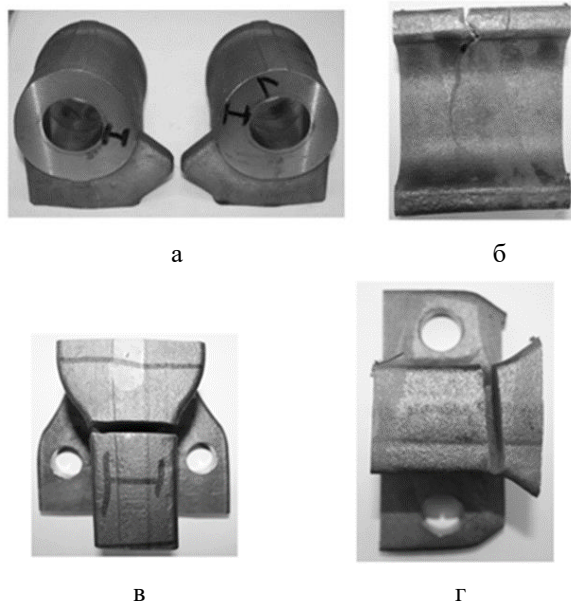


Рис. 1. Характерные места разрушения балки передней оси из-за поверхностных дефектов: а – в районе головки; б – по тавровому сечению; в, г – в районе подрессорной площадки

Fig. 1. Characteristic points of destruction of the front axle beam due to surface defects: a is in the area of the head; б is along the T-section; в, г are in the area of the spring pad

Поэтому первоочередной задачей для деталей является нейтрализация концентраторов напряжений, присутствующих на поверхности, и придание благоприятного сочетания структуры и свойств металла в основе изделия. Цель работы – разработка технологических решений по повышению циклической долговечности длинномерных стальных деталей машин.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись балки передней оси (БПО) автомобиля КАМАЗ, изготовленные из стали 45Х следующего химического состава: углерод – 0,46%, хром – 0,99%, марганец – 0,7%, кремний – 0,23%, никель – 0,03%, медь – 0,04%, сера – 0,027% и фосфор – 0,01%.

Химический состав металла деталей определялся на эмиссионном спектрометре «SPECTROMAX».

Микроструктурный анализ выполнялся на микроскопах «Неофот – 21» и «М – 7200» с программным обеспечением «Тиксомет». Измерение твердости проводилось на приборе ТР 5004 при использовании шарика $\varnothing 5$ мм и нагрузки 750 кгс. В результате визуального и магнитно-люминесцентного контроля выявляли поверхностные дефекты на деталях и полуфабрикатах. Геометрическая точность деталей определялась при измерительном контроле с использованием специальных приспособлений и устройств. Термическая обработка поковок выполнялась в производственных условиях в проходных печах с газовым обогревом. На каждой подвеске в вертикальном положении располагались по четыре поковки (рис. 2). Дробеобработка поковки осуществлялась в агрегате фирмы «Berget» дробью ДСЛУ-2.2 (ГОСТ 11964-81).

В процессах механической обработки оценивались стойкость сверл $\varnothing 35$ мм со сменными многогранными пластинами из твердого сплава при сверлении отверстий под крепеж и торцевых фрез $\varnothing 125$ мм при фрезеровании подрессорных площадок. Параметры резания: глубина резания 3 мм; скорость резания 235 м/мин и подача 0,21 мм/об при сверлении и 0,28 мм/зуб при фрезеровании.

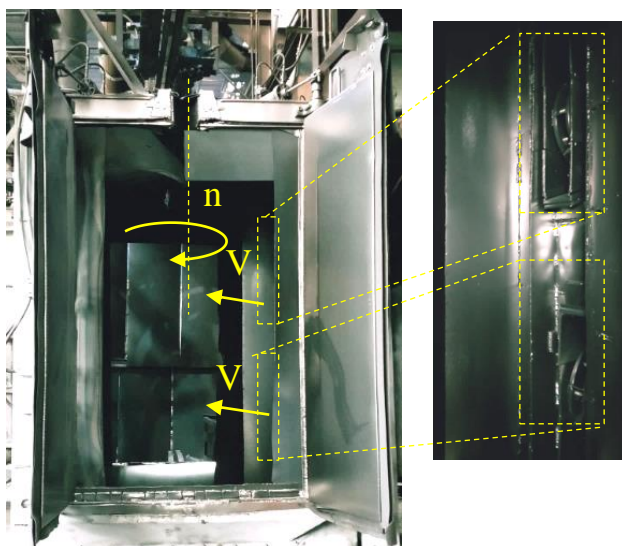
О циклической долговечности балок передней оси судили по результатам испытаний деталей на гидравлическом стенде со свободно установленными цилиндрами-домкратами PZA (Германия), оснащенном прибором ТКА-ПКМ модель 60 с диапазоном измерений от 80 до 106 кПа и гигрометром психрометрическим ВИТ-2 для измерений температуры, влажности и давления окружающей среды.

Результаты исследования и их обсуждение

В конструкции передней оси автомобиля наиболее нагруженной деталью является балка. В качестве полуфабриката для изготовления детали используют поковку, полученную с применением поперечно-клиновой прокатки и штамповки заготовок при температуре 1150-1240°C. После термической обработки и последующей дробеочистки поковки по отдельным участкам подвергают механической обработке: фрезерованию по подрессорным площадкам и сверлению отверстий под крепеж и в бобышках для установки шкворней. В таком состоянии деталь используют в сборочном узле – передней оси автомобиля. В процессе эксплуатации балка испытывает изгиб в различных плоскостях, кручение и ударные нагрузки, возникающие при прямолинейном и динамическом движении, заносе и торможении автомобиля. Для достижения на деталях высокого уровня свойств (более 1 млн циклов нагружений) необходимо решение комплексной задачи, направленной на гарантированное качество очистки поковок от окалины, нейтрализацию поверхностных дефектов и обезуглероженного слоя и создание сжимающих напряжений в поверхностном слое [5]. Эффективным способом повышения циклической долговечности балок передней оси является их поверхностное упрочнение в результате дробеобработки [7].



а



б

в

Рис. 2. Балки на подвеске (а), камера агрегата «Berger» дробенаклепа (б), роторы дробеметов и расположение турбин (в)

Fig. 2. The beams on the suspension (а), the chamber of the Berger shot blasting machine (б), the rotors of the shot blasting machines and the layout of the turbines (в)

В работе разработан, обоснован и впоследствии внедрен технологический процесс производства высокоустойчивых к циклическим нагрузкам балок передней оси, который включает в себя следующие стадии:

- горячая пластическая деформация (поперечно-клиноватая прокатка и последующая объемная штамповка);

- термическая обработка поковок (закалка при 860°C в 10%-м водном растворе Na_2CO_3 , отпуск при температуре 580°C и охлаждение потоком воздуха);

- очистка от окалины поковок дробью ДСЛУ-2.2 в течение 8 мин;

- визуальный и измерительный контроль поковок на наличие поверхностных дефектов и их геометрическую точность;

- правка изгибом (для поковок, имеющих запрещенное коробление);

- магнитно-люминесцентный контроль на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов;

- наклеп поверхности поковок дробью ДСЛУ-2.2 в течение 20 мин в агрегате «Berger» (см. рис. 2) и контроль степени наклепа;

- контроль качества поковок на соответствие требованиям ЧТД и КД.

Дробеобработка отштампованных поковок в течение 8 мин позволяет очистить их от окалины, но все же сохраняет на поверхности некоторые дефекты, которые в итоге оказывают отрицательное влияние на циклическую долговечность детали. К таковым относится обезуглероженный слой, складки металла в зоне обрезки облоя, заштампованная окалина и другие дефекты (см. рис. 1). По результатам стендовых испытаний установлено, что эти дефекты снижают долговечность деталей до 700 тыс. циклов и менее.

Неизбежным спутником поверхностного слоя является присутствие обезуглероженного слоя металла (рис. 3). Этот дефект наследуется как от используемого проката, так и приобретает в результате тепловых методов обработки – горячей пластической деформации металлозаготовок и термического улучшения поковок. Такое структурное состояние снижает твердость поверхностного слоя (рис. 4) и уменьшает усталостную прочность изделий.

Несмотря на нейтрализацию обезуглероженного слоя и других поверхностных дефектов путем дробеобработки (см. рис. 4), циклическая долговечность таких деталей все же не достигает максимального уровня, заложенного в материале – сталь 45Х. Об этом свидетельствуют разрушения деталей в процессе циклических испытаний, которые проходят в районе отверстия под шкворень на бобышке (рис. 5). Идентичный характер разрушений сохраняется как по левому, так и по правому отверстию детали.

В табл. 1 представлены сведения о циклической стойкости и показатели обрабатываемости балок передней оси, прошедшие дробенаклеп и имеющие различную твердость металла основы детали. Все поковки деталей подвергались закалке при 860°C в 10%-м водном растворе Na_2CO_3 и далее проходили высокий отпуск в интервале температур $560\text{--}620^{\circ}\text{C}$ для получения заданной твердости. После термической обработки на всех поковках микроструктура металла соответствовала сорбиту отпуска.

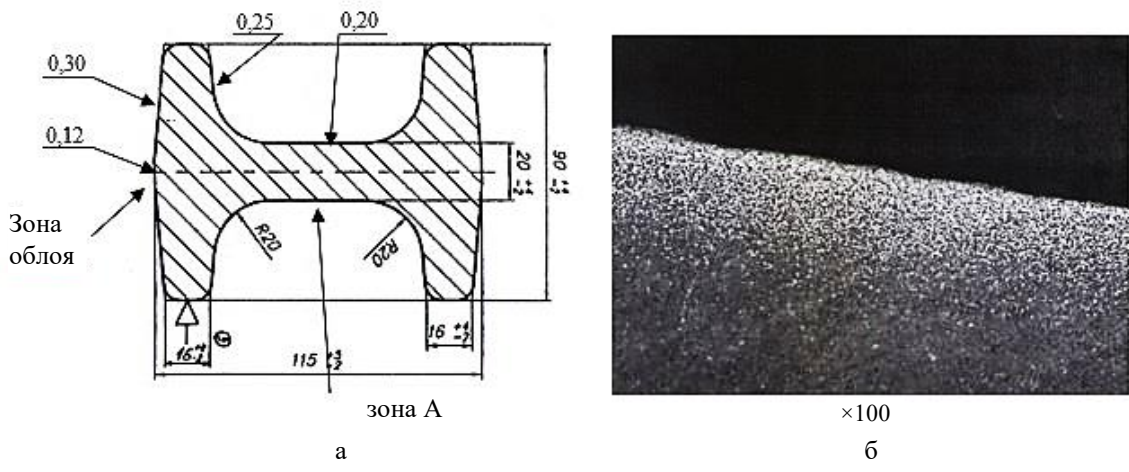


Рис. 3. Глубина обезуглероженного слоя по контуру таврового сечения центральной части балки передней оси (а) и микроструктура стали с обезуглероженным слоем на поверхности в зоне «А» (б)
 Fig. 3. Depth of the decarbonized layer along the contour of the T-section in the central part of the front axle beam (a) and the microstructure of steel with a decarbonized layer on the surface in zone A (b)

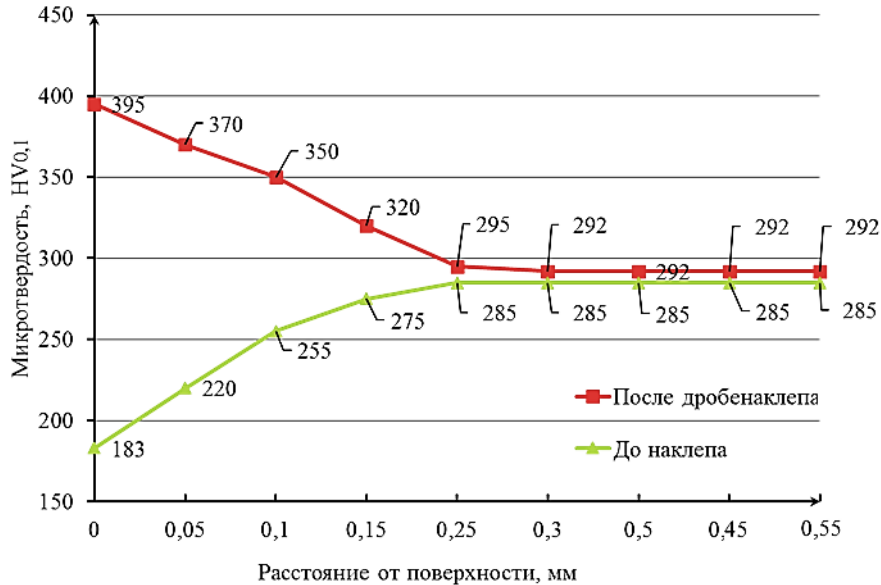


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине обезуглероженного слоя на поковках без дробеобработки и после дробенаклепа в течение 20 мин
 Fig. 4. Distribution of microhardness along the depth of the the decarbonized layer on the forgings without shot blasting and after 20 minutes of shot blasting

Таблица 1. Циклическая стойкость балки передней оси и показатели работоспособности (стойкости) режущего инструмента при механической обработке поковок
 Table 1. Syclic durability of the front axle beam and performance (durability) of the cutting tool in the machining of the forgings

Твердость НВ	265	269	285	293	302	311	321
Циклическая стойкость, тыс. циклов	945	1050	1105,3	1234,9	1502,3	1507,4	1506,8
Путь резания при сверлении, м	3228,1	3016,4	2910,6	2857,7	2804,6	2744,3	2598,2
Путь резания при фрезеровании, м	5174,9	4931,1	4695,1	4551,5	4415,4	4334,2	4147,4

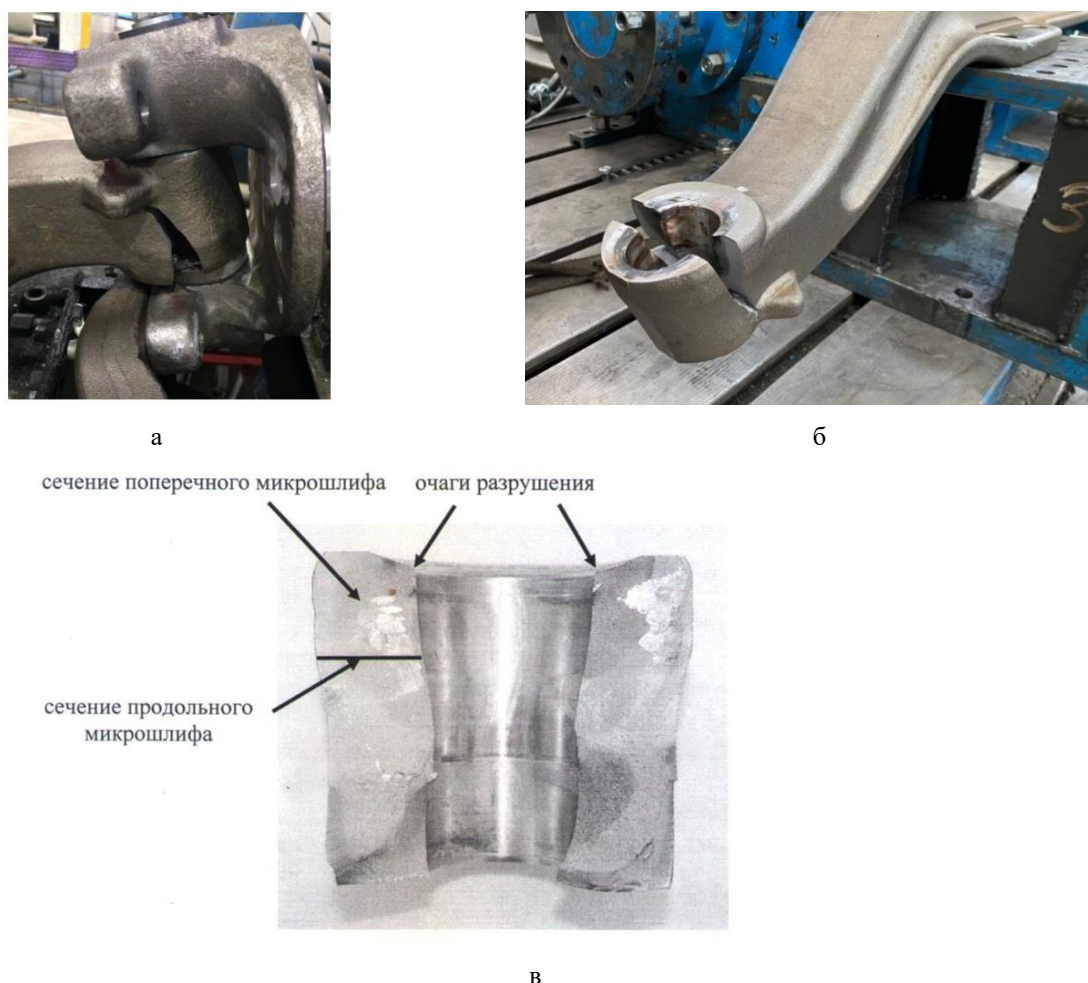


Рис. 5. Места разрушений балки после испытаний переднего моста: а – узел в сборе; б – разрушенная балка передней оси; в – фрактография усталостного излома

Fig. 5. Points of destruction of the beam after testing the front axle: а is an assembly unit; б is a destroyed front axle beam; в is fractography of fatigue fracture

Последующая дробеобработка балок в течение 20 мин обеспечивает повышение значений микротвердости поверхности до величины 400 НВ. Наклеп поверхностного слоя сохраняется до глубины 0,25 мм, что формирует в слое сжимающие напряжения, предотвращающие разрушение балки в местах концентраторов на необрабатываемых поверхностях балки. Степень наклепа зависит от фракционного состава дроби, настройки дробеметов, скорости вращения балок на подвесе, степени предварительной очистки поверхности балки от следов окалины и других переменных технологических факторов.

Исследованиями установлено, что в зоне разрушения всех деталей отсутствуют дефекты металлического характера, а загрязненность стали неметаллическими включениями не превышает 2 балла. Во всех случаях начало зарождения трещин усталости проходило с поверхности конусного отверстия (см. рис. 5). В процессе механической обработки поковок была оценена стойкость (работоспособность) режущего инструмента при сверлении и фрезеровании. В качестве критерия стойкости сверл и фрез бы принят путь резания, обес-

печивающий заданную степень точности размеров от принятой базы отсчета для детали. Выявлено, что с повышением твердости металла основы поковок снижается стойкость режущего инструмента и повышается циклическая долговечность деталей (см. табл. 1). Следует отметить, что значительное повышение твердости материала поковки ограничивается ростом расходов на инструмент. Так, при повышении твердости поковок с 255 до 321 НВ путь резания при сверлении снижается на 19,5% и при фрезеровании на 19,9% (см. табл. 1), что повышает себестоимость изготовления поковок. Как показали результаты исследований балок, благоприятное сочетание циклической долговечности деталей и стойкости режущего инструмента при механической обработке поковок приходится на твердость 269-311 НВ.

Для обеспечения контроля степени наклепа изготовлено специальное контрольное приспособление в виде балки с расположенными по ее длине 10-ю пластинами Альмена размерами – 76,2×19×1,3 мм [19]. Пластины изготовлены из легированной стали 70ГС, имеют твердость 44-50 HRC и установлены в кон-

структивно опасных местах и местах разрушений балки. Крепление пластинок к балке осуществляется винтами или болтами с использованием прижимных шайб.

В работе выполнен тестовый эксперимент, заключающийся в дробенаклепе балки с пластинами в камере при выполнении заданных условий обработки: использование свежей дробы без наличия колотой фракции, скорость поворота подвески 8 м/мин, длительность дробенаклепа в течение 20 мин в агрегате «Berger» после его наладки. Данные парных измерений прогиба и микротвердости приведены в табл. 2.

Полученные результаты показали, что о величине дробенаклепа можно судить по величине прогиба 3-х ключевых пластин Альмена (см. табл. 2). Ключевыми выбраны те точки, прогибы в которых минимальны, это точки 6, 10 и 12. Точки находятся в средней части балки и в зоне бобышки. Заданные параметры микротвердости поверхности достигаются при прогибе пластин от 4 до 5 мм. Обеспечение регулирования в этих пределах дает возможность стабильного обеспечения наклепа поверхности и значительного повышения циклической долговечности балок передней оси.

Заключение

1. Разработано и реализовано технологическое решение по двухстадийной дробеобработке балок

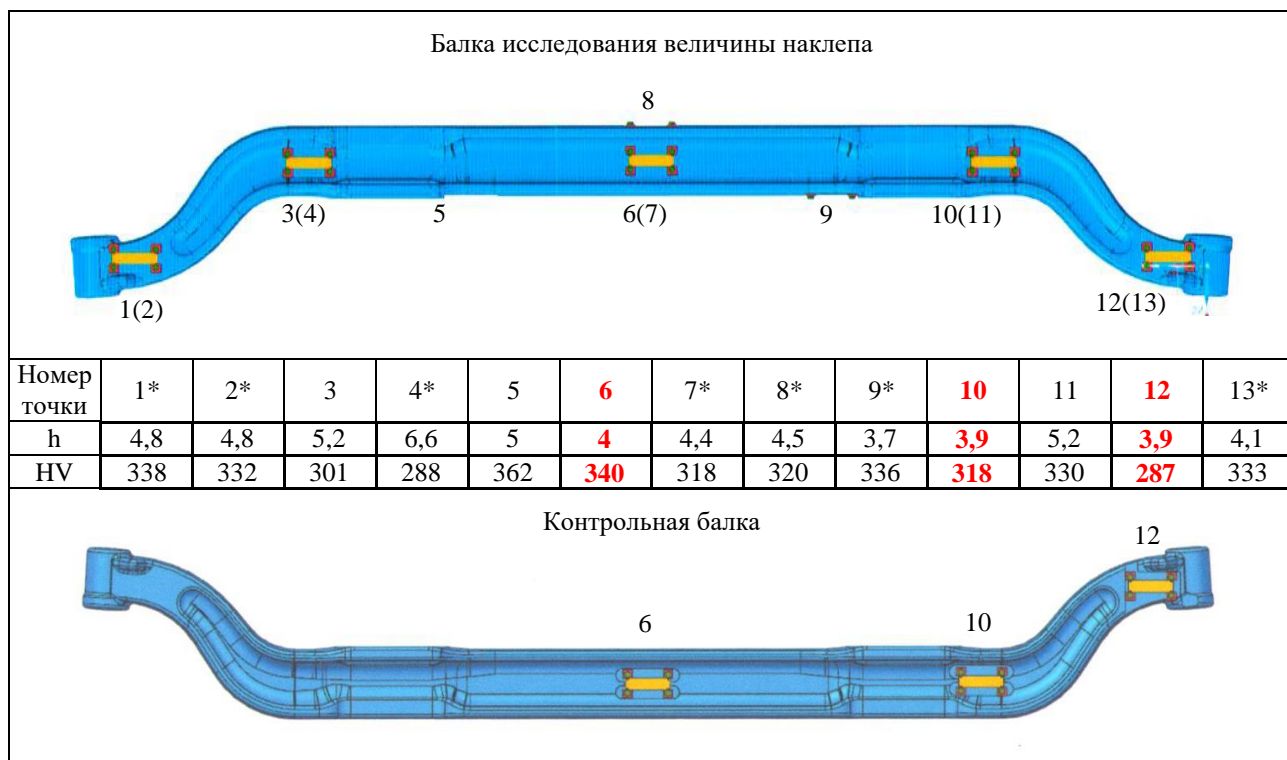
передней оси, позволяющее обеспечить заданный уровень циклической долговечности. Решение включает операции дробеочистки дробью ДСЛУ-2.2 в четырехтурбинном агрегате фирмы «Berger» в течение 8 мин, выполняемой после штамповки и термообработки с минимальным окислением поверхности поковок, а также операции дробенаклепа в течение 20 мин, выполняемой после операции холодной правки и люминисцентного контроля поверхностных дефектов материала поковок.

2. Предложен и внедрен технологический маршрут изготовления балок передней оси автомобиля КАМАЗ с использованием рациональных параметров термической обработки и дробенаклепа поверхности поковок, которые обеспечивают нейтрализацию поверхностных дефектов и обезуглероженного слоя, а также получение твердости металла основы детали в пределах 269-311 НВ. Эти технологические решения обеспечивают получение высокой долговечности деталей при их циклическом нагружении (более 1 млн циклов).

3. При оценке качества деталей необходимо применять визуальный, измерительный и магнитно-люминисцентный контроль. Эффекты дробенаклепа предлагается определять по величине прогиба пластины Альмена. Контроль деталей на твердость проводить на бобышке поковки.

Таблица 2. Расположение и величина контрольных пластин Альмена на поверхности исследовательской и контрольной балки

Table 2. The layout and size of the Almen control strips on the surface of the research and control beams



Примечание. Величина прогиба включает толщину пластины Альмена.
«*» – точки со стабильными условиями дробенаклепа.

Список источников

1. Глинер Р.Е., Астащенко В.И. Введение в технологию поверхностного упрочнения металла. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 328 с.
2. Effect of N₂ flow rate on microstructure and mechanical properties of PVD CrN_x coatings for tribological application in seawater / Shan L., Wang Y., Li J., Chen J. // *Surface and Coatings Technology*. 2014, vol. 242, iss. 4, pp. 74-82.
3. Totten G. E. *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007. 832 p.
4. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / Суслов А.Г., Фёдоров В.П., Горленко О.А. и др.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2022. 552 с.
5. Зубарев Ю.М. Технологическое обеспечение надежности эксплуатации машин. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 320 с.
6. Колобов А.Б. Прочностная надежность и долговечность деталей машин и конструкций. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
7. Технологические методы повышения качества изделий / Крупеня Е.Ю., Лебедев В.А., Болдырев А.И. и др. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2020. 129 с.
8. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
9. Колобов А.Б. Прочностная надежность и долговечность деталей машин и конструкций. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 192 с.
10. Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин / Глазунов В.А. и др.; отв. ред. Г.В. Москвитин; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. М.: Ленанд, 2018. 447 с.
11. Bertóti I. Characterization of nitride coatings by XPS // *Surface and Coatings Technology*. 2002, vol. 151-152, iss. 1, pp. 194-203.
12. Formation of nano-laminated structures in a dry sliding wear-induced layer under different wear mechanisms of 20CrNi2Mo steel / Yin C., Liang Y., Jiang Y. et al // *Applied Surface Science*. 2017, vol. 423, pp. 305-313.
13. Дробеударное упрочнение деталей машин / Матлин М.М., Лебский С.Л. и др. М.: Машиностроение, 2008. 230 с.
14. Упрочнение длинномерных стальных изделий методом дробеструйной обработки / В.И. Астащенко, Г.Ф. Мухаметзянова, Р.Е. Орлянский, И.Ж. Харисов // *Черные металлы*. 2023. №1. С. 26-31.
15. Benlahreche F.Z., Nouicer E. Improvement of surface properties of low carbon steel by nitriding treatment // *Acta Phys. Pol. A*. 2017, vol. 131, pp. 20-23.
16. Морозова Е.А., Морозов А.П., Муратов В.С. Влияние термической и поверхностной пластической обработок углеродистой стали на чувствительность к концентраторам напряжений при циклическом нагружении // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2020. №7. С. 328-332.
17. Effect of retained austenite stabilized via quench and partitioning on the strain hardening of martensitic steels / De Moor E., Lacroix S., Clarke A.J. et al. // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2008, vol. 39A, pp. 2586-2595.
18. Рудницкий Н.М., Казанченко Т.А. Влияние твердости, полученной при закалке стали 45 на выносливость после высокого отпуска // *Труды НАМИ*. 1966. Вып. 85. С. 15-26.
19. Патент на полезную модель 217098 РФ. Устройство для измерения интенсивности дробенаклепа поверхности металлоизделий / Астащенко В.И., Мухаметзянова Г.Ф., Харисов И.Ж., Махонин В.В., Карнилов А.Ю., Салыхов И.Ф., Орлянский В.Е., Пешков А.Н.; заявитель Публичное акционерное общество «КамАЗ» № 2022130603, заявл. 25.11.2022; опубл. 16.03.2023. 12 с.

References

1. Gliner R.E., Astashchenko V.I. *Vvedenie v tekhnologiyu poverkhnostnogo uprochneniya metalla* [Introduction to the technology of surface hardening of metal]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022, 328 p. (In Russ.)
2. Shan L., Wang Y., Li J., Chen J. Effect of N₂ flow rate on microstructure and mechanical properties of PVD CrN_x coatings for tribological application in seawater. *Surface and Coatings Technology*. 2014;242(4):74-82.
3. Totten G.E. *Steel heat treatment: Metallurgy and technologies*. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007, 832 p.
4. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A. et al. *Fundamentalnye osnovy tekhnologicheskogo obespecheniya i povysheniya nadezhnosti izdelii mashinostroeniya* [Fundamentals of technological support and reliability improvement of machine building products]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2022, 552 p. (In Russ.)
5. Zubarev Yu.M. *Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti ekspluatatsii mashin* [Technological support of reliability of machine operation]. Saint Petersburg: Lan, 2022, 320 p. (In Russ.)
6. Kolobov A.B. *Prochnostnaya nadezhnost i dolgovечnost detalei mashin i konstruktssii* [Strength reliability and durability of machine parts and structures]. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020, 192 p. (In Russ.)
7. Krupenya E.Yu., Lebedev V.A., Boldyrev A.I. et al. *Tekhnologicheskie metody povysheniya kachestva izdelii* [Technological methods for improving the quality of products]. Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2020, 129 p. (In Russ.)
8. Zinchenko V.M. *Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoi obrabotki* [En-

- gineering of a gear surface by methods of chemical and thermal treatment]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2001, 303 p. (In Russ.)
9. Kolobov A.B. *Prochnostnaya nadezhnost i dolgovechnost detalei mashin i konstruksii* [Strength reliability and durability of machine parts and structures]. Moscow; Volgda: Infra- Inzheneriya, 2020, 192 p. (In Russ.)
 10. Glazunov V.A. et al. *Perspektivnye metody poverkhnostnoi obrabotki detalei mashin* [Promising methods of surface treatment of machine parts]. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences. Moscow: LENAND, 2018, 447 p. (In Russ.)
 11. Bertóti I. Characterization of nitride coatings by XPS. *Surface and Coatings Technology*. 2002;151-152(1):194-203.
 12. Yin C., Liang Y., Jiang Y. et al. Formation of nanolaminated structures in a dry sliding wear-induced layer under different wear mechanisms of 20CrNi2Mo steel. *Applied Surface Science*. 2017;423:305-313.
 13. Matlin M.M., Lebsky S.L. et al. *Drobeudarnoe uprochnenie detalei mashin* [Shot blast hardening of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 230 p. (In Russ.)
 14. Astashchenko V.I., Mukhametzyanova G.F., Orlyansky R.E., Kharisov I.Zh. Hardening of long-length steel products by shot blasting. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2023;(1):26-31. (In Russ.)
 15. Benlahreche F.Z., Nouicer E. Improvement of surface properties of low carbon steel by nitriding treatment. *Acta Phys. Pol. A*. 2017;131:20-23.
 16. Morozova E.A., Morozov A.P., Muratov V.S. Influence of thermal treatment and surface hardening of carbon steel on sensitivity to stress concentrators under cyclic loading. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in Mechanical Engineering]. 2020;(7):328-332. (In Russ.)
 17. De Moor E., Lacroix S., Clarke A. J. et al. Effect of retained austenite stabilized via quench and partitioning on the strain hardening of martensitic steels. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2008;39A:2586-2595.
 18. Rudnitsky N.M., Kazanchenko T.A. Influence of hardness obtained by hardening steel 45 on the fatigue limit after high tempering. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI (Automobile and Engine Research Institute)]. 1966;(85):15-26. (In Russ.)
 19. Astashchenko V.I., Mukhametzyanova G.F., Kharisov I.Zh., Makhonin V.V., Karnilov A.Yu., Sal'yakhov I.F., Orlyansky V.E., Peshkov A.N. *Ustroistvo dlya izmereniya intensivnosti drobenaklepa poverkhnosti metalloizdelii* [Device for measuring the rate of shot blasting of the metalware surface]. Utility model patent, no. 217098, 2023.

Поступила 29.06.2023; принята к публикации 22.09.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 29/06/2023; revised 22/09/2023; published 28/03/2024

Кленько Сергей Викторович – директор Кузнечного завода ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия.
Email: fashutdinovai@gmail.com.

Асташченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: astvi-52@mail.ru. Scopus Author ID: 6507110140

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524. Scopus Author ID: 6603409746

Харисов Ильсур Жавдатович – начальник конструкторского бюро Кузнечного завода ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия. Email: HarisovIZ@kamaz.ru.

Орлянский Владимир Евгеньевич – начальник отдела агрегатов шасси научно-технического центра ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия. Email: Orlyanskiy@kamaz.ru.

Sergey V. Klenko – Director, Forging Plant, PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: fashutdinovai@gmail.com.

Vladimir I. Astashchenko – DrSc (Eng.), Professor, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: astvi-52@mail.ru. Scopus Author ID: 6507110140

Damir T. Safarov – PhD (Eng.), Associate Professor, Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524. Scopus Author ID: 6603409746

Ilsur Zh. Kharisov – Head of the Design Department, Forging Plant, PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia. Email: HarisovIZ@kamaz.ru.

Vladimir E. Orlyansky – Head of the Chassis Assembly Department of the Research and Development Center PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia. Email: Orlyanskiy@kamaz.ru.