

Песин М.В., Макаров В.Ф., Халтурин О.А., Павлович А.А., Мельников А.С., Макаренко Е.С. Повышение надежности нефтепромыслового и бурового оборудования путем комплексного конструкторско-технологического обеспечения изготовления и сборки резьбовых соединений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 91–100. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.11

Pesin M.V., Makarov V.F., Khalturin O.A., Pavlovich A.A., Melnikov A.S., Makarenkov E.S. Improving the reliability of oilfield and drilling equipment through integrated design and technological support for the manufacture and assembly of threaded connections. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 91–100. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.11

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 3, 2021
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.11
УДК 621.91

**М.В. Песин¹, В.Ф. Макаров¹, О.А. Халтурин¹, А.А. Павлович²,
А.С. Мельников¹, Е.С. Макаренко¹**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²ЗАО «СКБ», Пермь, Россия

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО И БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ПУТЕМ КОМПЛЕКСНОГО КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Рассмотрен комплексный подход к повышению надежности нефтепромыслового и бурового оборудования путем применения технологических и конструктивных решений при механической обработке резьбы и последующей управляемой сборке соединений. В современном производственном процессе добычи углеводородов широко используется метод наклонно-направленного и горизонтального бурения нефтяных и газовых скважин. При этом наблюдается повышенное пластическое давление в скважине, воздействие высоких температур на оборудование и другие осложняющие факторы, влияющие на стабильную работу изделий. В связи с этим конструкция и технология изготовления ответственных деталей нефтепромыслового и бурового оборудования требует применения более прочных и надежных, с высокими техническими характеристиками изделий.

Построены причинно-следственные связи, влияющие на надежность резьбы и резьбового соединения. Раскрыты причины и показаны эффективные решения проблемы низкой долговечности резьбовых соединений. Рассмотрены различные методы упрочнения поверхностей. Предложены наиболее перспективные методы поверхностной пластической деформации на основе обкатывания резьбы специальным профильным роликом.

Отмечено, что качество поверхностного слоя в основном характеризует ресурсные показатели наземного и подземного оборудования, применяемого в нефтегазовой отрасли. Выявлены ключевые операции технологического процесса изготовления детали, на которых формируются ее геометрические и физико-механические свойства. Повышение долговечности изделий с резьбой является одной из основных задач современного машиностроения. В качестве высокоэффективного метода, повышающего износостойкость резьбы, рассмотрена электрохимическая обработка.

Выполнены экспериментальные исследования для повышения надежности резьбовых соединений, рассмотрены сравнительные усталостные испытания образцов буровых труб с упрочнением резьбы и без упрочнения. Исследования выполнены на специальном стенде и по новой методике. Необходимо отметить, что для технологического процесса лезвийной обработки, последующего упрочнения впадин резьбы и сборки соединений важной является разработка методологических основ и практических рекомендаций.

Проведенный анализ ранних исследований научных школ и производственного опыта предприятий нефтяного машиностроения показал, что при комплексной оценке надежности следует учесть эффективность процесса резботочения и сборки резьбовых соединений с оптимальным моментом. При изготовлении специальных буровых, обсадных и насосно-компрессорных труб, а также других высоконагруженных деталей нефтепромыслового и бурового оборудования, важным является выполнение технологических требований и прогнозирование выходных параметров процесса резботочения.

Таким образом, создание теоретических основ конструкторско-технологического обеспечения надежности резьбовых соединений является актуальной научной задачей при изготовлении буровых труб и имеет важную практическую значимость для народного хозяйства Российской Федерации.

Ключевые слова: цифровые технологии, резьба, резботочение, упрочнение, обкатывание резьбы, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование, буровая труба, момент затяжки, сборка, нефтепромысловое оборудование, электрохимическая обработка.

M.V. Pesin¹, V.F. Makarov¹, O.A. Khalturin¹, A.A. Pavlovich²,
A.S. Melnikov¹, E.S. Makarenkov¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²CJSC "SKB", Perm, Russian Federation

IMPROVING THE RELIABILITY OF OILFIELD AND DRILLING EQUIPMENT THROUGH INTEGRATED DESIGN AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE MANUFACTURE AND ASSEMBLY OF THREADED CONNECTIONS

The article discusses an integrated approach to improving the reliability of oilfield and drilling equipment through the use of technological and design solutions for machining threads and subsequent controlled assembly of connections. In the modern production process of hydrocarbon production, the method of directional and horizontal drilling of oil and gas wells is widely used. At the same time, there is an increased reservoir pressure in the well, the effect of high temperatures on equipment and other complicating factors that affect the stable operation of products. In this regard, the design and manufacturing technology of critical parts of oilfield and drilling equipment requires the use of more durable and reliable products with high technical characteristics.

Causal relationships have been built that affect the reliability of the thread and threaded connection. Reasons are disclosed and effective solutions to the problem of low durability of threaded connections are shown. Various methods of surface hardening are considered. The most promising methods of surface plastic deformation based on thread rolling with a special profile roller are proposed.

It is noted that the quality of the surface layer mainly characterizes the resource indicators of surface and underground equipment used in the oil and gas industry. The key operations of the technological process of manufacturing a part on which its geometric and physical-mechanical properties are formed are identified. Improving the durability of threaded products is one of the main tasks of modern mechanical engineering. Electromechanical machining is considered as a highly effective method that increases the wear resistance of a thread.

Experimental studies are carried out to improve the reliability of threaded connections, comparative fatigue tests of drill pipe samples with and without thread hardening are considered. The studies were carried out on a special stand and using a new technique. It should be noted that the development of methodological foundations and practical recommendations is important for the technological process of blade processing, the subsequent hardening of thread valleys and assembly of joints.

The analysis of early studies of scientific schools and production experience of oil engineering enterprises showed that a comprehensive assessment of reliability should take into account the efficiency of the threading process and assembly of threaded connections with an optimal torque. In the manufacture of special drill pipes, casing and tubing, as well as other highly loaded parts of oilfield and drilling equipment, it is important to meet the technological requirements and predict the output parameters of the threading process.

Thus, the creation of the theoretical foundations for the design and technological provision of the reliability of threaded connections is an urgent scientific task in the manufacture of drill pipes and has an important practical significance for the national economy of the Russian Federation.

Keywords: digital technology, carving, hardening, deep rolling thread, residual stresses, surface plastic deformation, finite element modeling, drill pipe, thread cutter, thread turning, directional and horizontal drilling, horizontal drilling of oil and gas wells.

Введение

К машиностроительным предприятиям от нефтегазовых компаний и буровых подрядчиков поступают запросы на выпуск оборудования с повышенными требованиями к надежности, и, в частности, это проявилось в технологии наклонно-направленного и горизонтального бурения нефтяных и газовых скважин в условиях повышенного пластового давления и воздействия высоких температур. Здесь требуется более прочное и надежное, с высокими техническими характеристиками оборудование [1, 2].

Решением конструкторских и технологических задач повышения надежности бурового оборудования в Российской Федерации занимаются ООО «ПКНМ», ООО «ПКНМ-Урал», ОАО «Мотовилихинские заводы», ОАО «ТМК-Премиум Сервис», ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент» и др. Однако проведенные научные исследования, имеющийся производственный опыт машиностроительных предприятий нефтяной и газовой промышленности показали, что метод упрочнения резьб поверхностным пластическим деформированием не в полной мере изучен для обеспечения долговечности труб. Анализ научных работ и опыта исследователей пока-

зал, что не полностью изучены и не представлены в комплексе научные и методологические основы технологического процесса упрочнения резьбовых соединений, направленные на повышение надежности бурильных труб и других деталей.

Выполненные исследования показали, что наиболее эффективным решением этой проблемы является упрочнение поверхности дна впадины резьбы для повышения долговечности соединения. Среди различных рассмотренных методов упрочнения поверхностей наиболее перспективными являются метод поверхностной пластической деформации на основе обкатывания резьбы специальным профильным роликом и электромеханическая обработка¹ [3–35]. Ниппельная часть бурильной трубы показана на рис. 1.

¹ AGMA 912-A04. Mechanisms of Gear Tooth Failures. Alexandria, USA, 2004. 30 p.

AGMA 938-A05. Shot Peening of Gears. Alexandria, USA, 2005. 22 p.

AGMA 2005-C96. Design manual for bevel gears. Alexandria, USA, 1996. 104 p.

ANSI/AGMA 1010-F14. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure. Alexandria, USA, 2014. 89 p.

ANSI/AGMA 2003-C10. Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Generated Straight Bevel, Zerol Bevel and Spiral Bevel Gear Teeth. Alexandria, USA, 2010. 81 p.

Проведенные исследования показали, что при обкатывании резьбы роликом повышаются долговечность и надежность резьбовых соединений путем формирования рациональных сжимающих остаточных напряжений, увеличивается микротвердость и снижается шероховатость впадины резьбы [36–43]. В продолжение данных исследований необходимо определить влияние режимов резьботочения на качество поверхности резьбы и ее физико-механические свойства. Важным считается выполнение сборки деталей с оптимальным моментом свинчивания.



Рис. 1. Бурильные трубы

Необходимо отметить то, что ресурсные показатели наземного и подземного оборудования нефтегазовой отрасли в основном определяются качеством поверхностного слоя деталей, формируемого в течение всего технологического процесса изготовления детали. Задачей современного машиностроения является повышение долговечности изделий. Так, электрохимическая обработка (ЭМО) может обеспечить повышение износостойкости изделий и как следствие – надежности оборудования. ЭМО – это технология поверхностного упрочнения с применением концентрированных потоков энергии. В ее основе лежит комплексное термомеханическое воздействие на обрабатываемую деталь при прохождении через зону контакта детали электрического тока большой плотности и низкого напряжения. В итоге формируется эффективный упрочненный поверхностный слой на глубину 0,2–0,3 мм с повышенной микротвердостью и одновременным поверхностным наклепом, значительно повышающим износостойкость и сопротивление усталости детали, действие ЭМО распространяется на 2–3 мм в глубину обрабатываемого материала.

Для комплексного изучения надежности резьбовых соединений требуется проведение анализа технологической наследственности поверхностного слоя резьбы, формируемого в результате лезвийной обработки [4, 44–49]. Известны методы лазерного упрочнения поверхности, однако применительно к резьбе недостаточно проведенных исследований с целью разработки практических рекомендаций для предприятий машиностроительного комплекса [50].

Таким образом, разработка теоретических основ конструкторско-технологического обеспечения надежности деталей нефтепромыслового и бурового оборудования является актуальной научной задачей. Внедрение методик и практических рекомендаций при изготовлении и сборке резьбовых соединений важно для предприятий нефтяного машиностроения в Российской Федерации.

Постановка задачи

Разработать методологию, реализующую системный подход к обеспечению надежности нефтепромыслового и бурового оборудования за счет комплексной технологической и конструкторской проработки эксплуатационных факторов, режимов резания при резьботочении высоконагруженных резьб с обеспечением требуемой шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя, упрочняющей обработки с формированием технологических остаточных напряжений, рационального значения момента свинчивания резьб буровых труб,

Выполнение этой задачи возможно при проведении теоретических численных исследований, которые состоят в разработке физических и математических моделей, учитывающих эти факторы. В дальнейшем разработанные практические рекомендации послужат основой для осуществления технологических процессов обработки изделий с прогнозируемыми параметрами. Наиболее значимы эти разработки для компаний нефтяного, газового и горного машиностроения.

Результаты исследований

Производство изделий с высоконагруженной резьбой в Российской Федерации неуклонно увеличивается, наблюдается постоянный рост требований заказчиков к прочностным характеристикам изделий [51].

В процессе эксплуатации оборудования резьбовые соединения испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий, что нередко приводит к разрушению резьбовых соединений. В результате проведенных исследований установлено, что это носит преимущественно усталостный характер, в основном в зоне впадины резьбы, где зарождаются трещины. Одними из таких конструкторско-технологических требований, предъявляемых к резьбовым поверхностям буровых труб согласно ГОСТ Р.50864–96, являются шероховатость резьбы не более Ra 3,2 мкм и точность шага резьбы $\pm 0,04$ мм.

Анализ их исследований показал, что поверхностное пластическое деформирование приводит к образованию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, упрочнению поверхности, что способствует повышению сопротивления усталости и надежности деталей машин² [5–33, 51–53].

Для решения задач обеспечения качества замковых соединений бурильных труб разработана комплексная математическая модель замкового резьбового соединения бурильных труб (рис. 2), позволяющая оценивать влияние технологических параметров изготовления резьбы и условий эксплуатации на циклическую прочность резьбовых соединений.

После свинчивания резьбового соединения с некоторым моментом к соединению прикладывается вес колонны, который затем разгружается, формируя цикл. Получение напряжений в осевом сечении соединения для различных шагов нагружения дает возможность оценить изменения циклической прочности при варьировании различных исходных данных путем расчета амплитуд и средних напряжений цикла в каждом узле модели и их приведения по зависимости Гудмана к амплитудам эквивалентных напряжений симметричного цикла нагружения.

Проведенные исследования позволили определить зависимость максимальных эквивалентных амплитуд напряжений в узлах модели от момента затяжки резьбового соединения после циклического нагружения для деталей, изготовленных посередине поля допуска по стандарту, а также с различными отклонениями (рис. 3).

Анализ зависимости эквивалентных амплитуд напряжений от момента затяжки при отклонениях конусности показал преимущество полей допусков на конусность по API spec 7 и ГОСТ 28487–2018 перед установленными в ГОСТ Р 50864–96. Выполнение изделий посередине поля допуска в соответствии с API позволяет повысить крутящий момент.

С использованием основных программных комплексов ANSYS и ABAQUS, предназначенных для проведения многоцелевых инженерных междисциплинарных численных расчетов, получены зависимости, характер распределения остаточных напряжений и их визуализация.

Известны исследования, проведенные в области моделирования ППД деталей, в следующих странах:

- США: Каллен Морисон, Emuge, Хетч; M.D. Richards, M.E. Burnett, J.G. Speer и D.K. Matlock;
- Китай: You-Li Zhu, Kan Wang, Li Li и Yu-an-Lin Huang;
- Великобритания: A.M. Abrao, B. Denkena, B. Breidenstein, T. Mo; G.H. Majzoobi, F. Zare Jouneghani, E. Khademi;
- Франция: Jasenko Perenda, Jovan Trajkovski, Andrej Zerovnik и Ivan Prebil;
- Норвегия: A.P. Voskamp, E.J. Mittemeijer;
- Италия: Angelo Terranova и Laura Vergani.

Разработка методов математического моделирования упрочнения поверхностного слоя резьбовых соединений является одной из актуальных проблем для предприятий машиностроительной отрасли, с целью определения величины и характера распределения остаточных напряжений. Визуализация интенсивности остаточных напряжений при динамической постановке задачи с перемещением профильного деформирующего ролика вдоль резьбовой поверхности представлена на рис. 4.

В продолжение исследований следует отметить, что одним из направлений практического применения метода ППД является электромеханическая обработка (ЭМО). Она широко используется для повышения износостойкости плунжеров насосов высокого давления и НКТ, используемых при проведении гидроразрыва пласта (ГРП).

Проведены исследования по использованию электромеханической обработки (ЭМО) на образцах насосно-компрессорных труб (НКТ) и цилиндрах малого диаметра. Полученные результаты показали значительное повышение твердости поверхностного слоя обработанной поверхности. Так, твердость от 18–22 HRC возросла до 48–52 HRC, а на сталях с более высоким содержанием углерода и легирующих элементов от 36–37 HRC увеличилась до 48–49 HRC. При этом наблюдается плавное снижение твердости на глубину 0,5–0,6 мм, а эффект наблюдается до 1–2 мм; в зависимости от материала детали и режимов обработки ЭМО полученные значения могут изменяться, и для каждого материала и формы обрабатываемой поверхности требуется проведение исследования. К преимуществам ЭМО перед другими способами относят:

² AGMA 912-A04. Mechanisms of Gear Tooth Failures. Alexandria, USA, 2004. 30 p.

AGMA 938-A05. Shot Peening of Gears. Alexandria, USA, 2005. 22 p.

AGMA 2005-C96. Design manual for bevel gears. Alexandria, USA, 1996. 104 p.

ANSI/AGMA 1010-F14. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure. Alexandria, USA, 2014. 89 p.

ANSI/AGMA 2003-C10. Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Generated Straight Bevel, Zerol Bevel and Spiral Bevel Gear Teeth. Alexandria, USA, 2010. 81 p.

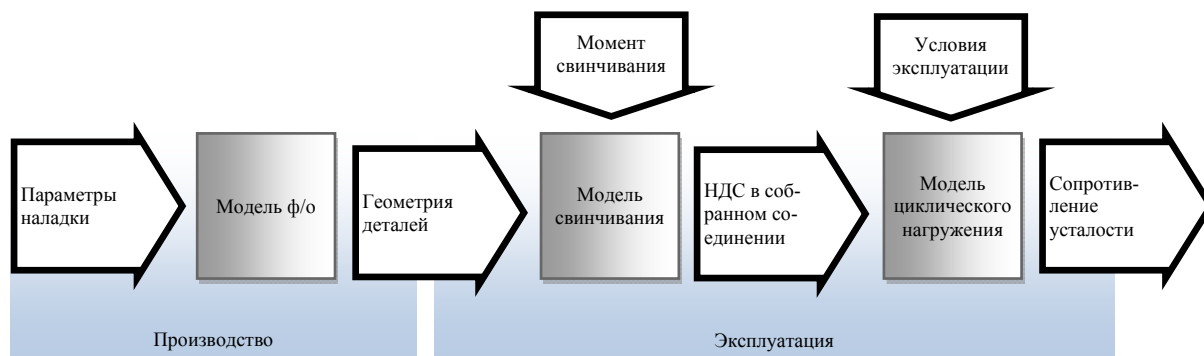


Рис. 2. Этапы математического моделирования технологического обеспечения сопротивления усталости замковых резьбовых соединений

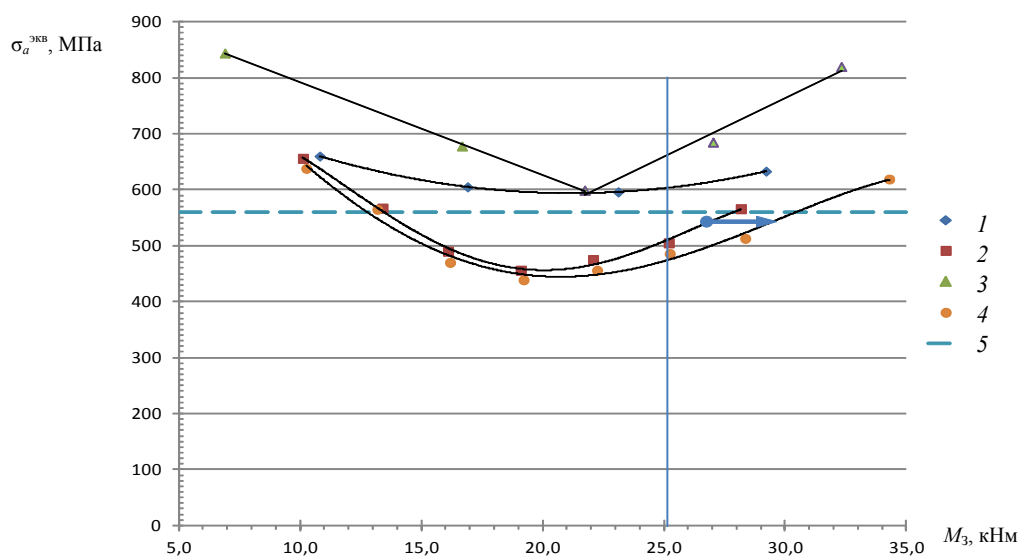


Рис. 3. Зависимость эквивалентных амплитуд напряжений от момента затяжки при отклонениях конусности (вертикальная линия – рекомендуемый производителем момент затяжки): 1 – конусность ниппеля минимальна, а муфты максимальна; 2 – середина поля допуска по конусности по ГОСТ Р 50864–96; 3 – конусность ниппеля максимальна, а муфты минимальна; 4 – середина поля допуска по конусности по ГОСТ 28487 и API 7; 5 – предел выносливости материала σ_{-1}

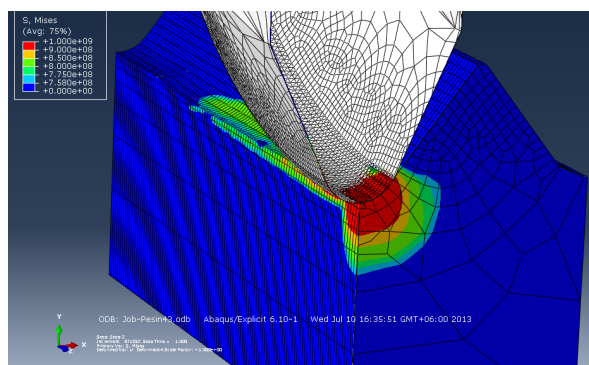


Рис. 4. Типовая картина распределения интенсивности остаточных напряжений в динамической постановке

- отсутствие обезуглероживания поверхностного слоя;
- отсутствие окисления поверхностного слоя;

- технологическая простота;
- повышение износостойкости до 12 раз;
- повышение предела выносливости на 30–200 %;
- закалка длинномерных и маложестких деталей.

Таким образом, проведенный анализ научно-технической литературы и опыта предприятий показал, что разработка методологических основ и практических рекомендаций для технологического процесса лезвийной обработки и последующего упрочнения впадин резьбовых соединений является актуальной научной и производственной задачей.

С целью повышения надежности нефтепромыслового и бурового оборудования следует рассмотреть повышение надежности изделий путем моделирования процесса упрочнения и эффективного использования электрохимической обра-

ботки для улучшения качества поверхности и повышения ее износостойкости. Предложенное сквозное моделирование позволяет наиболее оптимально подобрать параметры резьбы и технологической наладки оборудования для вновь вводимых типоразмеров, а также дать рекомендации по сборке бурильных колонн, включающие контроль момента затяжки при использовании ключей с автоматизированным считыванием текущих значений угла и момента свинчивания.

Выводы

Разработка методологических основ и практических рекомендаций для технологического процесса лезвийной обработки и последующего упрочнения впадин резьбовых соединений является актуальной научной и производственной задачей.

Наряду с этим для комплексной оценки надежности следует учесть эффективность процесса сборки резьбовых соединений с оптимальным моментом.

Для обеспечения надежности предложен комплексный подход к повышению надежности нефтепромыслового и бурового оборудования путем применения технологических и конструктивных решений при механической обработке резьбы и последующей управляемой сборке соединений.

Разработаны практические рекомендации для лезвийной обработки резьбы в пределах допусков на размер шага.

Определены режимы обработки для упрочнения поверхности резьбы методом обкатывания роликом, включающие силу прижима ролика, профильный угол, материал ролика, скорость вращения обрабатываемой заготовки.

Разработана промышленная установка для серийного производства упрочненных бурильных труб и переводников.

Проведены стендовые испытания, показывающие превышение упрочненной резьбы над неупрочненной в 3–4 раза.

Список литературы

1. Песин М.В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы бурильных труб обкатыванием роликом // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 5 (30). – С. 68–70.
2. Песин М.В., Мокронос Е.Д. Повышение надежности бурильных труб на стадии проектирования путем использования математического моделирования процесса упрочнения резьбовой поверхности // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 2 (27). – С. 56–57.
3. Песин М.В. Повышение надежности резьбовых соединений нефтегазовых изделий // Технология машиностроения – 2011. – № 9. – С. 49–50.

4. Васильев А.С. Статистическая модель трансформации свойств изделий в технологических средах // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 13–20.

5. Применение различных методов упрочняющей обработки деталей с целью повышения сопротивления усталостному разрушению / А.С. Горбунов, В.Ф. Макаров, С.П. Никитин, М.В. Песин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 9 (204). – С. 28–31.

6. Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Влияние последовательности обработки спирально-конических шестерен на распределение остаточных напряжений и величину наклепа поверхностного слоя зубьев // Технология машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 9–12.

7. Горбунов А.С., Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А. Формирование параметров качества поверхностного слоя зубьев спирально-конических шестерен с учетом влияния технологической наследственности // Научные технологии в машиностроении – 2015. – № 4 (46). – С. 40–47.

8. Горбунов А.С., Макаров В.Ф., Ворожцова Н.А. Современные методы исследования наследственных технологических остаточных напряжений зубьев спирально-конических шестерен и их взаимосвязи с усталостной прочностью // Справочник. Инженерный журнал. – 2015. – № 10 (223). – С. 56–61.

9. Горбунов А.С., Ворожцова Н.А., Горбунов А.С. Повышение усталостной прочности спирально-конических зубьев шестерен // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2015. – № 3 (42). – С. 114–131.

10. Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Исследование влияния технологической наследственности при обработке зубьев шестерен на качество поверхностного слоя и усталостную прочность // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2013. – Т. 2. – С. 158–161.

11. Дальский А.М. Аналитическое и графическое описание механизма технологического наследования // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1996. – № 3. – С. 29–35.

12. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. – М.: Высш. шк., 2001. – 496 с.

13. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.

14. Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

15. Киричек А.В., Федонин О.Н., Петрешин Д.И. Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей машин // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 4(82). – С. 43–48.

16. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А. Технология комбинированного упрочнения волной деформации и цементацией конструкционных низколегированных сталей // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 8(74). – С. 30–35.

17. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справ. – М.: Машиностроение, 1993. – 304 с.
18. Мамонтов В.А., Рубан А.Р. Влияние шероховатости впадин и переходных поверхностей зубьев колес, упрочняемых цементацией, на характеристики выносливости // Вестник АГТУ. – 2006. – № 2(31). – С. 242–245.
19. Макаров В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 440 с.
20. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. – СПб.: Лань, 2013. – 320 с.
21. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 356 с.
22. Перов Э.Н., Евсин Е.А. Рациональные статистические методы обеспечения качества / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1986. – 113 с.
23. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
24. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю. Концепция инженерии поверхностного слоя в категориях пластичности и технологического наследования // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 17–20.
25. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
26. Сулима А.М., Носков А.А., Серебряков Г.З. Основы технологии производства газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1996. – 408 с.
27. Сулов А.Г., Безъязычный В.Ф., Памфилов Ю.В. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 260 с.
28. Сулов А.Г., Михайлов А.Н. Разработка наукоемких функционально-ориентированных технологий в машиностроении // Наукоемкие технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.
29. Тамаркин М.А., Мельников А.С. Инженерное обеспечение качества машин: монография / ДГТУ. – Ростов-н/Д, 2011. – 231 с.
30. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.]; под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
31. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 226 с.
32. Ящерицин П.И., Фельдштейн Б.Э., Корниевич М.А. Теория резания: учеб. – Минск: Новое знание, 2005. – 511 с.
33. Stadtfeld H.J. The optimal high speed cutting of bevel gears. – Rochester NY, USA, 2006. – 26 p.
34. Pesin M.V. Simulation of the technological process of the strengthened treatment of the drill pipes thread // Urgent Problems of Up-to-Date Mechanical Engineering: Intern. Conf., Yurga, Russia, December 11-12, 2014 / UTI TPU. – Durnten-Zurich: TTP, 2015. – P. 476–482. – (Vol. 770. Applied Mechanics and Materials.)
35. Pesin M.V. Improving the reliability of threaded pipe joints // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32, no. 2. – P. 210–212.
36. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справ.: в 2 т. / С.К. Амбросимов, А.Н. Афонин, А.П. Бабичев [и др.]; под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2014. – Т. 2. – 444 с.
37. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / В.Н. Андреев, А.Н. Афонин, В.Ф. Безъязычный [и др.]. – М.: Инновационное машиностроение, 2018. – Т. 2. – 818 с.
38. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин // Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под ред. д-ра техн. наук, проф. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – С. 46–52.
39. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Моделирование остаточных напряжений на стадиях жизненного цикла изделий // Вестник машиностроения. – 2014. – № 12. – С. 21–25.
40. Блюменштейн В.Ю., Киричек А.В., Бабичев А.П. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Справочник. Инженерный журнал. – 2011. – № 5. – С. 47–52.
41. Киричек А.В., Афонин А.Н. Резьбонакатывание. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
42. Афонин А.Н., Мартынов Е.М. Упрочнение крупногабаритных резьб деталей машин горно-металлургического оборудования. // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Старый Оскол, 25–27 ноября 2015 г. – Старый Оскол, 2015. – Т. II. – С. 79–82.
43. Афонин А.Н., Саввин В.В., Киричек А.В. Моделирование накатывания с полнопрофильной схемой деформирования внутренних трапецидальных резьб методом конечных элементов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 4 (300). – С. 61–67.
44. Песин М.В. Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы буровых труб обкатыванием роликом // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 5 (30). – С. 68–70.
45. Якухин В.Г., Ставров В.А. Изготовление резьбы: справ. – М.: Машиностроение, 1989. – 192 с.
46. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии / ДГТУ. – Ростов н/Д, 2008. – 694 с.
47. Безъязычный В.Ф., Водолагин А.Л. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и явление технологической наследственности: учеб. пособие. – Рыбинск, 2011. – 87 с.
48. Безъязычный В.Ф., Водолагин А.Л. Исследование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин с учетом технологической наследственности // Вестник РГТА. – 2008. – № 1. – С. 15–20.
49. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.М. Зо-

логаревский, А.И. Кондаков; под ред. д-ра техн. наук А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.

50. Advanced materials for mechanical engineering: ultrafine-grained alloys with multilayer coatings / I.P. Semenova, R.Z. Valiev, A.M. Smyslov, M.V. Pesin, T.G. Langdon // *Adv. Eng. Mater.* – 2021. – 2100145. DOI.org/10.1002/adem.202100145

51. Macdonald K.A. Failure analysis of drillstrigs // *Engineering Failure Analysis.* – 2007. – No. 14. – P. 1641–1666.

52. Xiao-Hua Zhu The parameter sensibility analysis for fishing box tap based on the overall process of elastoplasticity in oil and gas wells // *Mathematical and Computer Modeling.* – 2013. – No. 58. – P. 1540–1547.

53. Fares Y. Determining the life cycle of bolts using a local approach and the Dang Van criterion // *Fatigue & Fracture & Engineering Materials & Structures.* – 2006. – No. 29. – P. 588–596.

References

1. Pesin M.V. Nauchnye osnovy modelirovaniia protsessa uprochneniia vpadiny rez'by buril'nykh trub obkатыvaniem rolikom [Scientific Basis for Modeling the Drill Pipe Thread Hollowing Process by Rolling]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, 2013, no. 5 (30), pp. 68–70.

2. Pesin M.V., Mokronosov E.D. Povyshenie nadezhnosti buril'nykh trub na stadii proektirovaniia putem ispol'zovaniia matematicheskogo modelirovaniia protsessa uprochneniia rez'bovoi poverkhnosti [Improvement of drill pipe reliability at the design stage by using mathematical modeling of the thread surface hardening process]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, 2013, no. 2 (27), pp. 56–57.

3. Pesin M.V. Povyshenie nadezhnosti rez'bovykh soedinenii neftegazovykh izdelii [Improving the reliability of threaded connections of oil and gas products]. *Tekhnologiia mashinostroeniia*, 2011, no. 9, pp. 49–50.

4. Vasil'ev A.S. Statisticheskaiia model' transformatsii svoistv izdelii v tekhnologicheskikh sredakh [Statistical model of the transformation of product properties in technological environments]. *Vestnik MGTU. Seriia Mashinostroenie*, 1997, no. 4, pp. 13–20.

5. Gorbunov A.S., Makarov V.F., Nikitin S.P., Pesin M.V. Primenenie razlichnykh metodov uprochniiaushchei obrabotki detalei s tsel'iu povysheniia soprotivleniia ustalostnomu razrusheniui [Application of different methods of hardening treatment of parts in order to increase resistance to fatigue failure]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 9 (204), pp. 28–31.

6. Gorbunov A.S., Makarov V.F. Vliianie posledovatel'nosti obrabotki spiral'no-konicheskikh shesteren na raspredelenie ostatochnykh napriazhenii i velichinu naklepa poverkhnostnogo sloia zub'ev [Influence of the machining sequence of spiral bevel gears on the distribution of residual stresses and the magnitude of the hardening of the surface layer of the teeth]. *Tekhnologiia mashinostroeniia*, 2012, no. 3, pp. 9–12.

7. Gorbunov A.S., Makarov V.F., Vorozhtsova N.A. Formirovanie parametrov kachestva poverkhnostnogo sloia zub'ev spiral'no-konicheskikh shesteren s uchetom vliianiia tekhnologicheskoi nasledstvennosti [Formation of quality parameters of the surface layer of the teeth of spiral bevel

gears, taking into account the influence of technological heredity]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroeniui*, 2015, no. 4 (46), pp. 40–47.

8. Gorbunov A.S., Makarov V.F., Vorozhtsova N.A. Sovremennye metody issledovaniia nasledstvennykh tekhnologicheskikh ostatochnykh napriazhenii zub'ev spiral'no-konicheskikh shesteren i ikh vzaimosviazi s ustalostnoi prochnost'iu [Modern research methods for hereditary technological residual stresses of spiral bevel gear teeth and their relationship with fatigue strength]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2015, no. 10 (223), pp. 56–61.

9. Gorbunov A.S., Vorozhtsova N.A., Gorbunov A.S. Povyshenie ustalostnoi prochnosti spiral'no-konicheskikh zub'ev shesteren [Increasing the fatigue strength of spiral bevel gear teeth]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aero-kosmicheskaiia tekhnika*, 2015, no. 3 (42), pp. 114–131.

10. Gorbunov A.S., Makarov V.F. Issledovanie vliianiia tekhnologicheskoi nasledstvennosti pri obra-botke zub'ev shesteren na kachestvo poverkhnostnogo sloia i ustalostnuiu prochnost' [Study of the effect of technological heredity in gear teeth machining on the quality of the surface layer and fatigue strength]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*, 2013, vol. 2, pp. 158–161.

11. Dal'skii A.M. Analiticheskoe i graficheskoe opisanie mekhanizma tekhnologicheskogo nasledovaniia [Analytical and graphical description of the technological inheritance mechanism]. *Vestnik MGTU. Mashinostroenie*, 1996, no. 3, pp. 29–35.

12. Eliseev Iu.S., Krymov V.V., Nezhurin I.P. Proizvodstvo zubchatykh koles gazoturbinykh dvigatelei [Production of gas turbine engine gears]. Moscow: Vysshiaia shkola, 2001, 496 p.

13. Zinchenko V.M. Inzheneriia poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoi obrabotki [Gear Surface Engineering by Chemical-Thermal Treatment Methods]. Moscow, 2001, 303 p.

14. Kalashnikov A.S. Tekhnologiia izgotovleniia zubchatykh koles [Gear Technology]. Moscow: Mashinostroenie, 2004, 480 p.

15. Kirichek A.V., Fedonin O.N., Petreshin D.I. Tekhnologicheskoe povyshenie ekspluatatsionnykh svoistv detalei mashin [Technological improvement of operational properties of machine parts]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroeniui*, 2018, no. 4(82), pp. 43–48.

16. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Silant'ev S.A. Tekhnologiia kombinirovannogo uprochneniia volnoi deformatsii i tsementatsiei konstruksionnykh nizkolegированных stali [Technology of combined deformation wave hardening and cementation of structural low-alloy steels]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroeniui*, 2017, no. 8(74), pp. 30–35.

17. Kuznetsov N.D., Tseitlin V.I., Volkov V.I. Tekhnologicheskie metody povysheniia nadezhnosti detalei mashin [Technological methods to improve the reliability of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 304 p.

18. Mamontov V.A., Ruban A.R. Vliianie sherokhovatosti vpadin i perekhodnykh poverkhnostei zub'ev koles, uprochniiaemykh tsementatsiei, na kharakteristiki vynoslivosti [Influence of Roughness of Tsurple and Transition Surfaces of Cemented Gear Teeth on Endurance Characteristics]. *Vestnik AGTU*, 2006, no. 2(31), pp. 242–245.

19. Makarov V.F. Optimizatsiia protyagivaniia trudnoobrabatyvaemykh materialov: monografiia [Optimization of pulling through hard-to-machine materials]. Saryi Oskol: TNT, 2014, 440 p.
20. Makarov V.F. Sovremennye metody vysoko-effektivnoi abrazivnoi obrabotki zharoprochnykh stali i splavov [Modern Methods of Highly Effective Abrasive Processing of Heat-Resistant Steels and Alloys]. Saint-Petersburg: Lan', 2013, 320 p.
21. Odintsov L.G. Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 356 p.
22. Perov E.N., Evsin E.A. Ratsional'nye statisticheskie metody obespecheniia kachestva [Rational statistical methods for quality assurance]. Perm', 1986, 113 p.
23. Smelianskii V.M. Mekhanika uprochneniia detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 300 p.
24. Smelianskii V.M., Bliumenshtein V.Iu. Kontseptsii inzhenerii poverkhnostnogo sloia v kategoriakh plastichnosti i tekhnologicheskogo nasledovaniia [The concept of surface layer engineering in the categories of plasticity and technological inheritance]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2001, no. 4, pp. 17–20.
25. Starkov V.K. Shlifovanie vysokoporistymi krugami [Grinding with highly porous grinding wheels]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 688 p.
26. Sulima A.M., Noskov A.A., Serebriakov G.Z. Osnovy tekhnologii proizvodstva gazoturbinykh dvigatelei [Fundamentals of Gas Turbine Engine Production Technology]. Moscow: Mashinostroenie, 1996, 408 p.
27. Suslov A.G., Bez"iazychnyi V.F., Pamfilov Iu.V. Inzheneriia poverkhnosti detalei [Surface engineering of parts]. Ed. A.G. Suslova. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 260 p.
28. Suslov A.G., Mikhailov A.N. Razrabotka naukoemkikh funktsional'no-orientirovannykh tekhnologii v mashinostroenii [Development of knowledge-intensive function-oriented technologies in mechanical engineering]. Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. Ed. A.G. Suslova. Moscow: Mashinostroenie, 2012, 528 p.
29. Tamarkin M.A., Mel'nikov A.S. Inzhenernoe obespechenie kachestva mashin: monografiia [Engineering Quality Assurance of Machines: Monograph]. DGTU. Rostov-na-Donu, 2011, 231 p.
30. Dal'skii A.M., Bazrov B.M., Vasil'ev A.S. et al. Tekhnologicheskaiia nasledstvennost' v mashinostroitel'nom proizvodstve [Technological heredity in mechanical engineering production] Ed. A.M. Dal'skogo. Moscow: Izdatelstvo MAI, 2000, 364 p.
31. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. Tekhnologicheskie ostatochnye napriazheniia i ikh vliianie na dolgovechnost' i nadezhnost' metalloizdelii [Technological residual stresses and their influence on durability and reliability of metal products]. Perm', 2012, 226 p.
32. Iashcheritsin P.I., Fel'dshtein B.E., Komievich M.A. Teoriia rezaniia [Теория резания]. Minsk: Novoe znanie, 2005, 511 p.
33. Stadtfeld H.J. The optimal high speed cutting of bevel gears. Rochester NY, USA, 2006, 26 p.
34. Pesin M.V. Simulation of the technological process of the strengthened treatment of the drill pipes thread. Urgent Problems of Up-to-Date Mechanical Engineering: Internet Conferentsiia. UTI TPU. Durnten-Zurich: TTP, 2015, pp. 476–482. (Vol. 770. Applied Mechanics and Materials.)
35. Pesin M.V. Improving the reliability of threaded pipe joints. *Russian Engineering Research*, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 210–212.
36. Ambrosimov S.K., Afonin A.N., Babichev A.P. et al. Tekhnologii i instrumenty otdelchno-uprochniushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Technology and tools for finish-strengthening machining of parts by surface plastic deformation]. Ed. A.G. Suslova. Moscow: Mashinostroenie, 2014, vol. 2, 444 p.
37. Andreev V.N., Afonin A.N., Bez"iazychnyi V.F. et al. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia [Handbook for the mechanical engineering technologist]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018, vol. 2, 818 p.
38. Bliumenshtein V.Iu. Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniia na stadiakh zhiznennogo tsikla otvetstvennykh detalei mashin [Mechanics of technological inheritance in the life cycle stages of critical machine parts]. *Entsiklopediia poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia*. Ed. S.A. Zaidesa. Irkutsk, 2015, pp. 46–52.
39. Bliumenshtein V.Iu., Makhlov M.S. Modelirovanie ostatochnykh napriazhenii na stadiakh zhiznennogo tsikla izdelii [Residual stress modeling at product life cycle stages]. *Vestnik mashinostroeniia*, 2014, no. 12, pp. 21–25.
40. Bliumenshtein V.Iu., Kirichek A.V., Babichev A.P. Sovremennye konkurentosposobnye tekhnologii otdelchno-uprochniushchei obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Modern competitive technologies of surface plastic deformation finishing and hardening]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2011, no. 5, pp. 47–52.
41. Kirichek A.V., Afonin A.N. Rez'bonakatyvanie. Biblioteka tekhnologa [Thread rolling. Technologist's Library]. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 312 p.
42. Afonin A.N., Martynov E.M. Uprochnenie krupnogabaritnykh rez'b detalei mashin gorno-metallurgicheskogo oborudovaniia [Strengthening of large-sized threads of machine parts for mining and metallurgical equipment]. *Sovremennye problemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa. Nauka i proizvodstvo: materialy XII Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem*. Saryi Oskol, 2015, vol. II, pp. 79–82.
43. Afonin A.N., Savvin V.V., Kirichek A.V. Modelirovanie nakatyvaniia s polnoprofil'noi skhemoi deformirovaniia vnutrennikh trapetsoidal'nykh rez'b metodom konechnykh elementov [Rolling Simulation with Full-Profile Deformation Scheme for Internal Trapezoidal Threads by Finite Element Method]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2013, no. 4 (300), pp. 61–67.
44. Pesin M.V. Nauchnye osnovy modelirovaniia protsessa uprochneniia vpadiny rez'by buril'nykh trub obkатыvaniem rolikom [Scientific Basis for Modeling the Drill Pipe Thread Hollowing Process by Rolling]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, 2013, no. 5 (30), pp. 68–70.
45. Iakukhin V.G., Stavrov V.A. Izgotovlenie rez'by: sprav [Making threads]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 192 p.

46. Babichev A.P., Babichev I.A. *Osnovy vibratsionnoi tekhnologii* [Fundamentals of Vibration Technology]. DGTU. Rostov na-Donu, 2008, 694 p.

47. Bez"iazychnyi V.F., Vodolagin A.L. *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoistv detalei mashin i iavlenie tekhnologicheskoi nasledstvennosti* [Technological support of operational properties of machine parts and the phenomenon of technological heredity]. Rybinsk, 2011, 87 p.

48. Bez"iazychnyi V.F., Vodolagin A.L. *Issledovanie vliianiia tekhnologicheskikh uslovii obrabotki na ekspluatatsionnye svoistva detalei mashin s uchetom tekhnologicheskoi nasledstvennosti* [Study of the influence of technological processing conditions on the performance properties of machine parts with regard to technological heredity]. *Vestnik RGATA*, 2008, no. 1, pp. 15–20.

49. Vasil'ev A.S., Dal'skii A.M., Zolotarevskii Iu.M., Kondakov A.I. *Napravlennoe formirovanie svoistv izdelii mashinostroeniia* [Directed formation of the properties of mechanical engineering products]. Ed. A.I. Kondakova. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 352 p.

50. Semenova I.P., Valiev R.Z., Smyslov A.M., Pesin M.V., Langdon T.G. *Advanced materials for mechanical engineering: ultrafine-grained alloys with multi-layer coatings*. *Adv. Eng. Mater.*, 2021, 2100145. DOI.org/10.1002/adem.202100145

51. Macdonald K.A. *Failure analysis of drillstrigs*. *Engineering Failure Analysis*, 2007, no. 14, pp. 1641–1666.

52. Xiao-Hua Zhu *The parameter sensibility analysis for fishing box tap based on the overall process of elastoplasticity in oil and gas wells*. *Mathematical and Computer Modeling*, 2013, no. 58, pp. 1540–1547.

53. Fares Y. *Determining the life cycle of bolts using a local approach and the Dang Van criterion*. *Fatigue & Fracture & Engineering Materials & Structures*, 2006, no. 29, pp. 588–596.

Получено 30.07.2021

Опубликовано 30.09.2021

Сведения об авторах

Песин Михаил Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, и.о. декана механико-технологического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: m.pesin@mail.ru.

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: makarovv@pstu.ru.

Халтурин Олег Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: m.pesin@mail.ru.

Павлович Александр Алексеевич (Пермь, Россия) – начальник бюро инструментального хозяйства ЗАО «СКБ», e-mail: m.pesin@mail.ru.

Мельников Сергей Алексеевич (Пермь, Россия) – инженер-технолог Центра высокопроизводительных производственных технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: m.pesin@mail.ru.

Макаренко Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: m.pesin@mail.ru.

About the authors

Mikhail V. Pesin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, The Dean of Mechanical Technological Faculty, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: m.pesin@mail.ru.

Vladimir F. Makarov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: makarovv@pstu.ru.

Oleg A. Khalturin (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: m.pesin@mail.ru.

Alexander A. Pavlovich (Perm, Russian Federation) – Leading Process Engineer, CJSC “SKB”, e-mail: m.pesin@mail.ru.

Sergey A. Melnikov (Perm, Russian Federation) – Process Engineer, Center for High-Performance Manufacturing Technologies, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: m.pesin@mail.ru.

Evgeniy S. Makarenkov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: m.pesin@mail.ru.