

УДК 622.23.051.78
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4768
Шифр специальности ВАК: 2.8.2
Научная статья

Использование промежуточных элементов из сплавов с термоупругими фазовыми превращениями для фиксации зубьев в шарошках буровых долот

Э.Ю.О. Балаев¹, М.А. Самарин¹, Н.А. Шостак^{1,2✉}

¹ Кубанский государственный технологический университет, Россия, г. Краснодар

² Кубанский государственный университет, Россия, г. Краснодар

✉nikeith@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Одним из проблемных элементов конструкций шарошечных долот является сопряжение зубьев и шарошки. Известно, что на первых этапах бурения возможно выпадение зубьев, что, в свою очередь, снижает эффективность долота, а наличие на забое скважины элементов шарошечного долота с твердостью, равной твердости самого инструмента, приводит к быстрому выходу из строя и влечет за собой издержки, связанные с внештатными ремонтно-профилактическими работами и устранением неполадок. **Цель.** Поднимается вопрос об увеличении надежности фиксации твердосплавного вооружения шарошечных долот путем применения промежуточных элементов, выполненных из сплавов с термоупругими фазовыми превращениями. **Методы.** Руководствуясь принципом эффективного использования явлений эффекта памяти формы и псевдоупругости (сверхэластичности), свойственных данному классу материалов, был произведен анализ условий работы шарошечных долот, разработана конструкция, позволяющая изменить принцип монтажа зубьев в шарошки долота, подобран оптимальный сплав никелида титана, проведены испытания, подтверждающие положительный эффект от предлагаемого метода. Предлагается использование для фиксации зубьев в шарошке бурового долота переходных фиксирующих элементов, изготовленных из сплавов с термоупругими фазовыми превращениями и имеющих геометрические особенности, позволяющие обеспечить фиксацию зубьев с фиксирующим элементом и шарошкой за счет геометрии, представляющей собой конусное или фрикционно-конусное соединение. **Оборудование.** В процессе работ были использованы: прибор для проведения съемки рентгенофлуоресцентного анализа Shimadzu EDX-8000, дифрактометр рентгеновский Shimadzu XRD-7000, 3D-сканер со структурированным подсветом RangeVision DIY, испытательная машина на растяжение Instron 8801. **Результаты и выводы.** На основании проведенных испытаний был сделан вывод, что подобранные метод монтажа, материал и конструкция позволят увеличить надежность фиксации твердосплавных зубьев и, как следствие, увеличить проходку на одно долото, и уменьшит риск нештатной ситуации. Это, в свою очередь, будет способствовать сокращению материальных и временных затрат, закладываемых на этапе проекта строительства скважин.

Ключевые слова: термоупругие фазовые превращения, эффект памяти формы, псевдоупругость/сверхэластичность, шарошечные долота, никелид титана, буровое оборудование

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00547, <https://rscf.ru/project/23-29-00547/>.

Для цитирования: Балаев Э.Ю.О., Самарин М.А., Шостак Н.А. Использование промежуточных элементов из сплавов с термоупругими фазовыми превращениями для фиксации зубьев в шарошках буровых долот // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 25–34. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4768

UDC 622.23.051.78
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4768
Scientific paper

Application of intermediate elements made of alloys with thermoelastic phase transformations for fixing teeth in drill bit rollers

E.Yu.O. Balaev¹, M.A. Samarin¹, N.A. Shostak^{1,2}✉

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

² Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

✉nikeith@mail.ru

Abstract. Relevance. One of the problematic elements of roller bit designs is the coupling of the teeth and the roller cutter. It is known that at the first stages of drilling, teeth may fall out, which in its turn reduces the efficiency of the bit, and the presence of roller bit elements at the well bottom with a hardness equal to the hardness of the tool itself leads to rapid failure and entails costs associated with emergency repair and maintenance work and troubleshooting. **Aim.** The article raises issue of increasing the reliability of fixing the hard-alloy structure of roller bits by using intermediate elements made of alloys with thermoelastic phase transformations. **Methods.** Guided by the principle of efficient use of the shape memory effect and pseudoelasticity (superelasticity) phenomena inherent in this class of materials, the operating conditions of roller bits were analyzed, a design was developed that allows changing the principle of mounting teeth in the roller bit, an optimal titanium nickelide alloy was selected, and tests were conducted that confirmed the positive effect of the proposed method. It is proposed to use transitional locking elements for fixing teeth in the roller bit of a drill bit, made of alloys with thermoelastic phase transformations and having geometric features that allow fixing the teeth with the locking element and the roller due to the geometry, which is a conical or friction-conical connection. **Equipment.** The following equipment was used in the course of the work: a Shimadzu EDX-8000 X-ray fluorescence analysis device, a Shimadzu XRD-7000 X-ray diffractometer, a RangeVision DIY structured illumination 3D scanner, and an Instron 8801 tensile testing machine. **Results and conclusions.** Based on the tests, it was concluded that the selected installation method, material, and design will increase the reliability of the hard-alloy teeth fixation and, as a result, increase the penetration per bit, and reduce the risk of an emergency. This, in its turn, will help reduce the material and time costs included at the well construction stage.

Keywords: thermoelastic phase transformations, shape memory effect, pseudoelasticity/superelasticity, roller bits, titanium nickelide, drilling equipment

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-29-00547, <https://rscf.ru/project/23-29-00547/>

For citation: Balaev E.Yu.O., Samarin M.A., Shostak N.A. Application of intermediate elements made of alloys with thermoelastic phase transformations for fixing teeth in drill bit rollers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 25–34. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4768

Введение

Одно из основных направлений использования сплавов с термоупругими фазовыми превращениями (ТУФП) связано с применением эффекта памяти формы (ЭПФ) с целью обеспечения надежной фиксации сопрягаемых деталей. Это связано с возможностью придания изделию формы, которая обеспечивает легкость проведения монтажа в мартенситном фазовом состоянии, и возможностью восстановления геометрических характеристик, соответствующих эксплуатационным требованиям, при прямом фазовом переходе с дальнейшей эксплуатацией в аустенитном фазовом состоянии. Такой способ фиксации сопрягаемых деталей известен и широко распространен в различных высокотехнологических отраслях и показал высокие эксплуатационные характеристики [1, 2].

Использование данного принципа в буровом породоразрушающем инструменте позволит повысить как надежность, так и эффективность его использования. На сегодняшний день известно широкое применение для бурения скважин шарошечных долот с твердосплавным вооружением. Это связано с соотношением себестоимости и эффективности данного типа бурового инструмента [3, 4]. Однако одним из проблемных элементов конструкции данного вида долот является сопряжение зубьев и шарошки. Известно, что на первых этапах бурения возможно выпадение зубьев из шарошки, что, в свою очередь, снижает эффективность долота, а наличие на забое скважины элементов шарошечного долота с твердостью, равной твердости самого инструмента, приводит к быстрому выходу из строя и влечет за собой издержки, связанные с

внештатными ремонтно-профилактическими работами и устранением неполадок [5].

Легкость вылета зубьев из тела шарошки связана с использованием для фиксации зубьев в специальном отверстии посадки с гарантированным натягом, как правило, по 9–12 квалитетам. При этом с учетом полей допусков данных квалитетов значение натяга имеет широкий диапазон разброса. В связи с этим рядом специалистов предлагается вводить на этапе сборки метод групповой взаимозаменяемости, однако данный способ сборки значительно повышает трудоемкость изготовления шарошечного долота и отражается на его себестоимости, значительно повышая ее [6].

Предлагается использование для фиксации зубьев в шарошке бурового долота переходных фиксирующих элементов, изготовленных из сплавов с ТУФП и имеющих геометрические особенности, позволяющие обеспечить фиксацию зубьев с фиксирующим элементом и фиксирующего элемента с шарошкой за счет геометрии, представляющей собой конусное или фрикционно-конусное соединение [7, 8].

Обоснование предлагаемого решения

Сплавы с ТУФП представляют собой соединения, способные к полиморфизму как при температурных, так и при механических воздействиях. При этом фазовый переход происходит бездиффузионно при скорости распространения перемещений атомов ниже скорости звука в данной среде, благодаря чему сохраняется как соседство между атомами, так и положения дислокационных структур за счет упорядоченного коллективного смещения. Это, в свою очередь, является источником таких важных явлений, как ЭПФ и псевдоупругость (сверхэластичность), способных значительно изменить конструкцию деталей и механизмов [1, 2, 9, 10]. Проведенные испытания показывают достаточный уровень стойкости у данного типа интеллектуальных материалов в средах, характерных для нефтегазовой отрасли, а наличие большого разнообразия сплавов, проявляющих данные свойства, позволяет подбирать необходимые составы в зависимости от особенностей эксплуатации. Все вышеперечисленные факторы показывают высокий потенциал в применении сплавов с ТУФП с целью увеличения надежности и срока эксплуатации нефтегазового оборудования.

Как было указано выше, выпадение зубьев в процессе бурения является частым и негативным явлением. Выпавшие зубья, попадая под зубья вращающихся шарошек, приводят к их сколу, уменьшая тем самым породоразрушающую способность долота. Поэтому любые затраты, связанные с повышением надежности фиксации зубьев на

корпусе шарошки, не идут в сравнение с теми потерями, которые имеют место при выпадении зубьев. Посадка с натягом не обеспечивает необходимого усилия, достаточного для удержания зубьев в корпусе долота, а значительное увеличение разницы линейного размера посадочного места корпуса и основания зуба способствует возникновению напряжений, которые могут привести к разрушению как зубьев, так и самого корпуса шарошки. Также это может стать причиной преждевременного зарождения и быстрого раскрытия (перемещения) трещин от места сопряжения как в корпусе шарошки, так и в зубе. Наиболее продуктивным методом монтажа на данный момент остается метод селективного (группового) подбора, требующий значительного количества времени и не позволяющий до конца решить проблему быстрого вылета зубьев из тела шарошки [6, 11]. Повышение надежности фиксации зубьев в корпусе шарошки может быть обеспечено за счет особенностей формы посадочного отверстия в корпусе шарошки и за счет формы основания зубьев. Так, применяя конусную форму (усеченный конус), можно обеспечить фиксацию геометрией, а выпадение зубьев становится невозможным, так как удержание зубьев обеспечивается не силой трения покоя (посадка с натягом), а самой геометрией, поэтому потеря зубьев возможна лишь при разрушении самого зуба.

При посадке с натягом зуб в посадочном отверстии удерживается за счет сил трения, которые прямо пропорциональны силе обжатия зуба посадочной цилиндрической поверхностью. При фиксации геометрией по предлагаемому принципу за счет обратной конусности зуб и посадочное отверстие в шарошке при вырывании работают на сдвиг/срез. Таким образом, для вырыва зуба необходимо сдвинуть слой материала либо зуба, либо шарошки вокруг посадочного отверстия. Как правило, усилие, необходимое для такого сдвига, значительно превышает необходимое усилие для впрессовки и выпрессовки зуба при использовании посадки с натягом.

Обеспечение возможности соединения зубьев и корпуса шарошки с применением обратной конусности посадочного отверстия на данный момент возможно лишь за счет изготовления литьем или использования материала с ЭПФ (что и предлагается авторами). В случае литья получаемое изделие имеет множественные дефекты, которые являются причиной преждевременного выхода из строя шарошечного долота. Наличие резких переходов в литейной форме приводит к возникновению раковин, ужимов и недоливов в местах сопряжения зубьев и корпуса шарошки долот. Высокотемпературное воздействие при взаимодействии литейного сплава корпуса шарошки на зубья способствует

изменению структуры материала, из которого изготовлены зубья, что также приводит к снижению физико-механических характеристик материала зубьев.

Стоит отметить, что при фиксации геометрий в поверхностных слоях посадочного отверстия не возникают напряжения и деформации, в отличие от посадки с натягом, где имеются напряжения и деформации, обеспечивающие необходимое усилие для надежной фиксации зуба в посадочном отверстии долота. Это важно отметить именно потому, что данные начальные напряжения понижают допустимые внешние нагрузки на зубья, что приводит к их преждевременному разрушению.

Принцип предлагаемого способа монтажа [7, 8] описан ниже. Устанавливаемую втулку, изготовленную из материала с ТУФП (ЭПФ), охлаждают до температуры, соответствующей низкотемпературному фазовому состоянию материала (мартенсит). Далее ей задают форму, обеспечивающую свободную установку в отверстие. Ее нагревают до температуры, соответствующей высокотемпературному фазовому состоянию материала (аустенит), благодаря чему она приобретает первоначальную форму, самоцентрируется и самофиксируется в посадочные отверстия корпуса, обеспечивая плотное сопряжение по всем внешним поверхностям. Далее после охлаждения втулки в нее впрессовывается твердосплавный зуб, после чего втулка снова нагревается до аустенитного состояния, происходит плотное сопряжение поверхностей зуба и внутренней поверхности втулки. Демонтаж или замена проводятся в обратной последовательности.

Таким образом, предлагаемое решение может в значительной степени увеличить продолжительность безаварийных работ, повышая надежность соединения, что, в свою очередь, может сократить экономические и временные потери, связанные с выходом из строя буровых шарошечных долот с твердосплавным вооружением.

Оборудование, методика эксперимента и применяемые материалы

Известно, что в процессе бурения скважины зубья и рабочая поверхность шарошки бурового долота могут достигать температуры, варьируемой в пределах 100–200 °С в зависимости от используемой промывочной жидкости, геологических условий и режимов бурения. Так, подбор материала с ТУФП для промежуточных фиксирующих элементов был основан на эффективном использовании явления псевдоупругости/сверхэластичности в процессе эксплуатации. Это позволило бы промежуточным элементам выдерживать большее значение переменных нагрузок в процессе эксплуатации. Таким образом, температура образования мартенсита деформации сплава с ТУФП должна быть вы-

ше температуры рабочей поверхности шарошечного долота. Вторым критерий подбора материала основан на выборе в качестве используемого сплава никелида титана (нитинол). Это связано с тем, что сплавы с ТУФП (ЭПФ) на основе никелида титана обладают высоким процентом обратимой деформации (~9 %), а температуры начала и конца фазовых переходов могут регулироваться за счет соотношения никеля (Ni) и титана (Ti) друг к другу [12–16].

Так, для изготовления промежуточного фиксирующего элемента было предложено использовать сплав Ni-55.74 и Ti-баланс с температурой конца аустенитного превращения $A_f=130$ °С. Полученный прутки из никелида титана (рис. 1) данной конфигурации был исследован рентгенофлуоресцентным и рентгенофазовым методами анализа.

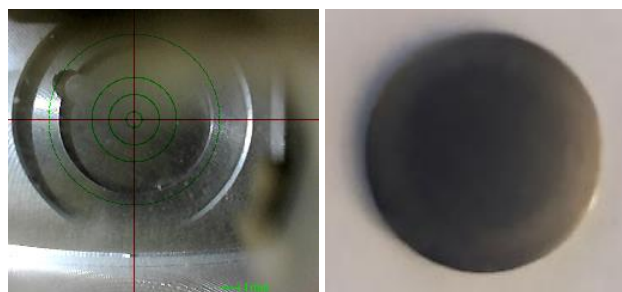


Рис. 1. Фотография образца из полученного прутка для исследования

Fig. 1. Photo of a sample from the resulting rod for research

Условия проведения съемки рентгенофлуоресцентного анализа: прибор Shimadzu EDX-8000 (Япония), материал анода рентгеновской трубки – родий, время экспозиции – 800 с, диаметр облучаемой зоны – 10 мм, атмосфера – вакуум. Энергетический спектр образца, полученный при проведении рентгенофлуоресцентного анализа, представлен на рис. 2. Полученный элементный состав образца представлен в таблице.

Условия проведения съемки рентгенофазового анализа: дифрактометр рентгеновский «Shimadzu XRD-7000 (Япония), Cu K α – 1,54 Å, 40 кВ, 30mA, диапазон углов 20–90 град., скорость съемки 1 град/мин. Дифрактограммы образца представлены на рис. 3.

Как видно из дифрактограмм, углы рефлексов при комнатной температуре показывают наличие фаз B2, R, B19 и B19'. Это говорит о том, что при комнатной температуре у данного сплава также присутствуют аустенитные фазы. Указанное может быть связано со смещением соотношения Ni к Ti из-за допускаемой неравномерности химического состава по сечению, получаемого при подготовке проб (шлифов). Также присутствуют промежуточные фазы на примере R-фазы и B19-фазы, что также

говорит о смещении процентного соотношения Ni и Ti и свидетельствует о непрямом B2→B19', а, возможно, о двухступенчатом переходе из аустенита в мартенсит с образованием промежуточных фаз.

Помимо этого, было проведено калориметрическое исследование для установления температуры начала и конца аустенитного фазового превращения методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Исследование проводилось в диапазоне температур от +20 до +450 °С при скорости нагрева 5 град./мин. Термограмма термогравиметрия с кривой ДСК показаны на рис. 4.

Таким образом, данный сплав удовлетворяет критериям по условиям подбора для использования в рабочем инструменте бурового оборудования. Стоит отметить, что у полученного сплава температура конца аустенитного превращения $A_f=121,7-131$ °С (рис. 4). При комнатной температуре сплав находится в мартенситном фазовом состоянии.

Для определения деформационного поведения втулки (промежуточного элемента) из никелида титана, были изготовлены специальные оснастки (рис. 5, а–в), адаптированные для возможности проведения лабораторных исследований с использованием испытательной машины на растяжение Instron 8801 (рис. 5, г). Так, сборка состоит из оснастки – 1 с наконечником, имитирующим штыревой элемент, и цилиндрической поверхностью

под захват испытательной машины на растяжение и оснастки – 2 с глухим отверстием, имитирующим посадочное отверстие на теле шарошки, также с цилиндрической поверхностью под захват испытательной машины на растяжение. Отверстие конической формы с углом наклона, образующей к оси 3°. В данное отверстие устанавливается промежуточная фиксирующая втулка конической формы с одинаковым углом наклона, образующей внутреннюю и внешнюю поверхности к оси, равному также 3°, как и у посадочного отверстия. Установка втулки в коническое отверстие оснастки – 2 происходит путем прессования на ручном прессе NORDBERG с последующим нагревом до температуры конца прямого фазового перехода (мартенсит-аустенитного) с использованием технического фена GHG 23-66 BOSCH с регулированием температуры (рис. 5, д, е). Контроль температуры нагрева по всей поверхности до заданной производился при помощи тепловизора Guide T120. После чего в установленную в оснастку – 2 втулку впрессовывался штыревой элемент оснастки – 1 аналогичным способом с последующим контролируемым нагревом до температуры полного фазового превращения мартенсита в аустенит (рис. 5, ж, з). Стоит отметить, что штыревой элемент оснастки – 1 также имеет конусность, аналогичную втулке и посадочному отверстию оснастки – 2.

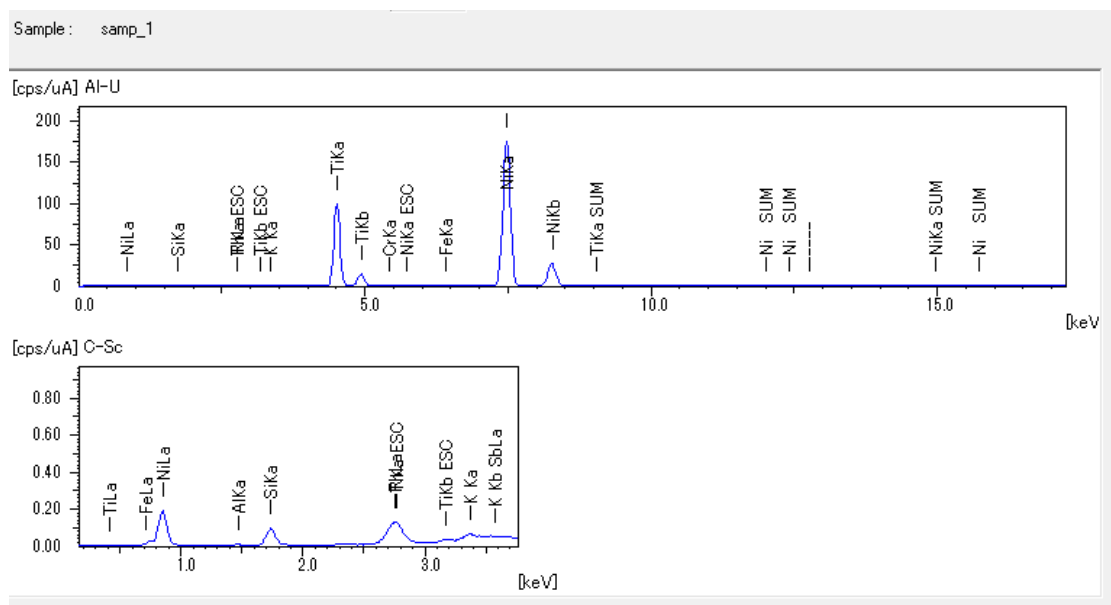


Рис. 2. Энергетический спектр образца

Fig. 2. Energy spectrum of the sample

Таблица. Элементный состав образца

Table. Elemental composition of the sample

Элемент/Element	Ni	Ti	Si	K	Fe	Al	Cr	Ca
Содержание/Content, %	55,7	43,3	0,41	0,24	0,16	0,09	0,046	0,021

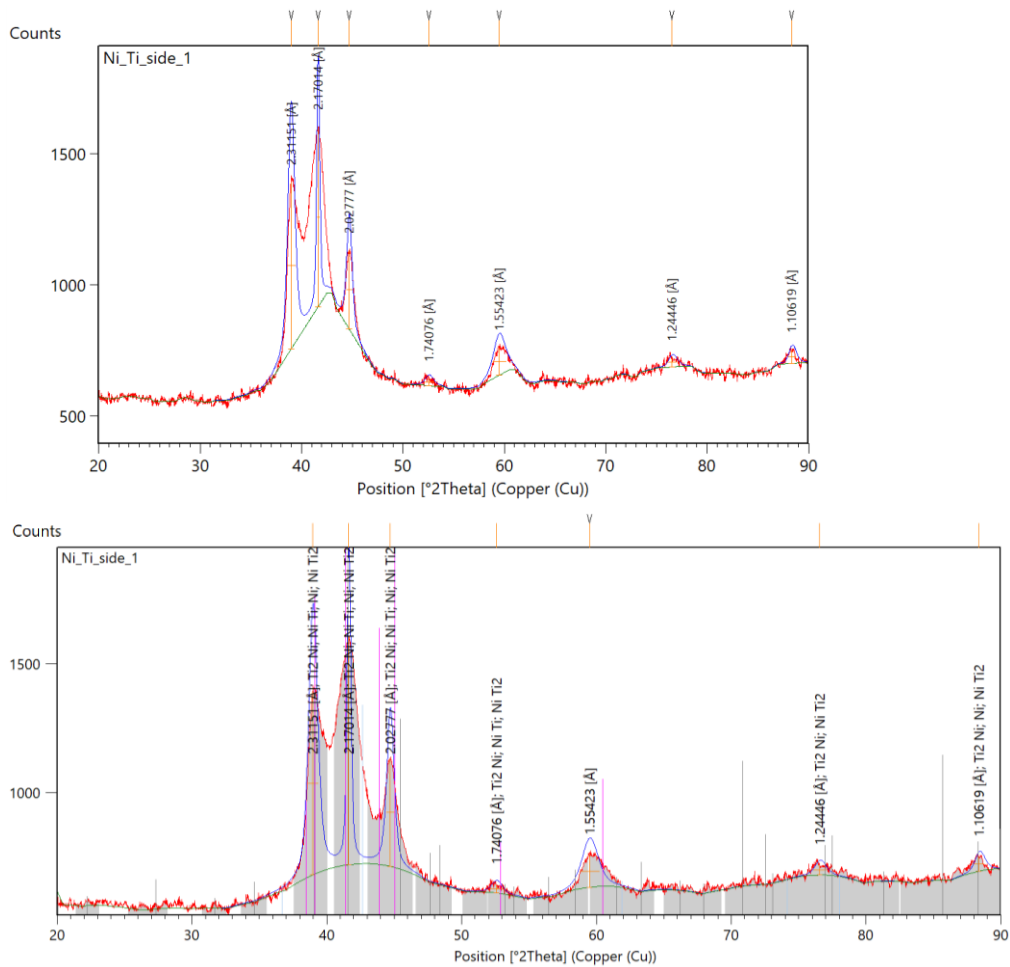


Рис. 3. Дифрактограммы образца
Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the sample

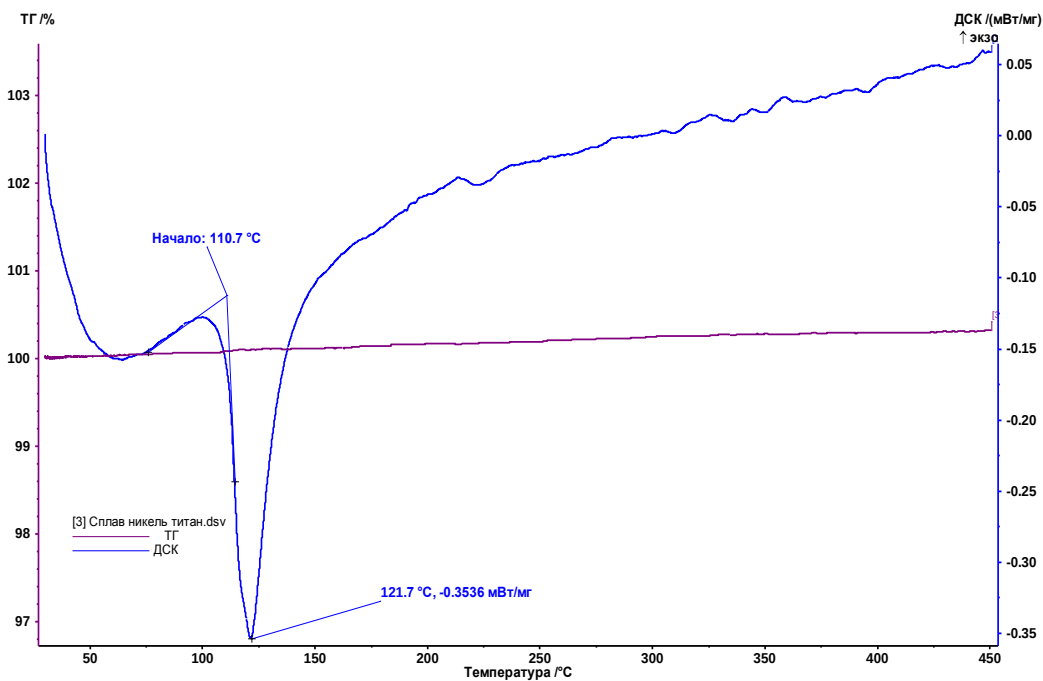


Рис. 4. Термограмма сплава Ni-55.74 и Ti-баланс с эффектом памяти формы, кривые ТГ и ДСК
Fig. 4. Thermogram of Ni-55.74 alloy and Ti-balance with shape memory effect, TG and DSC curves

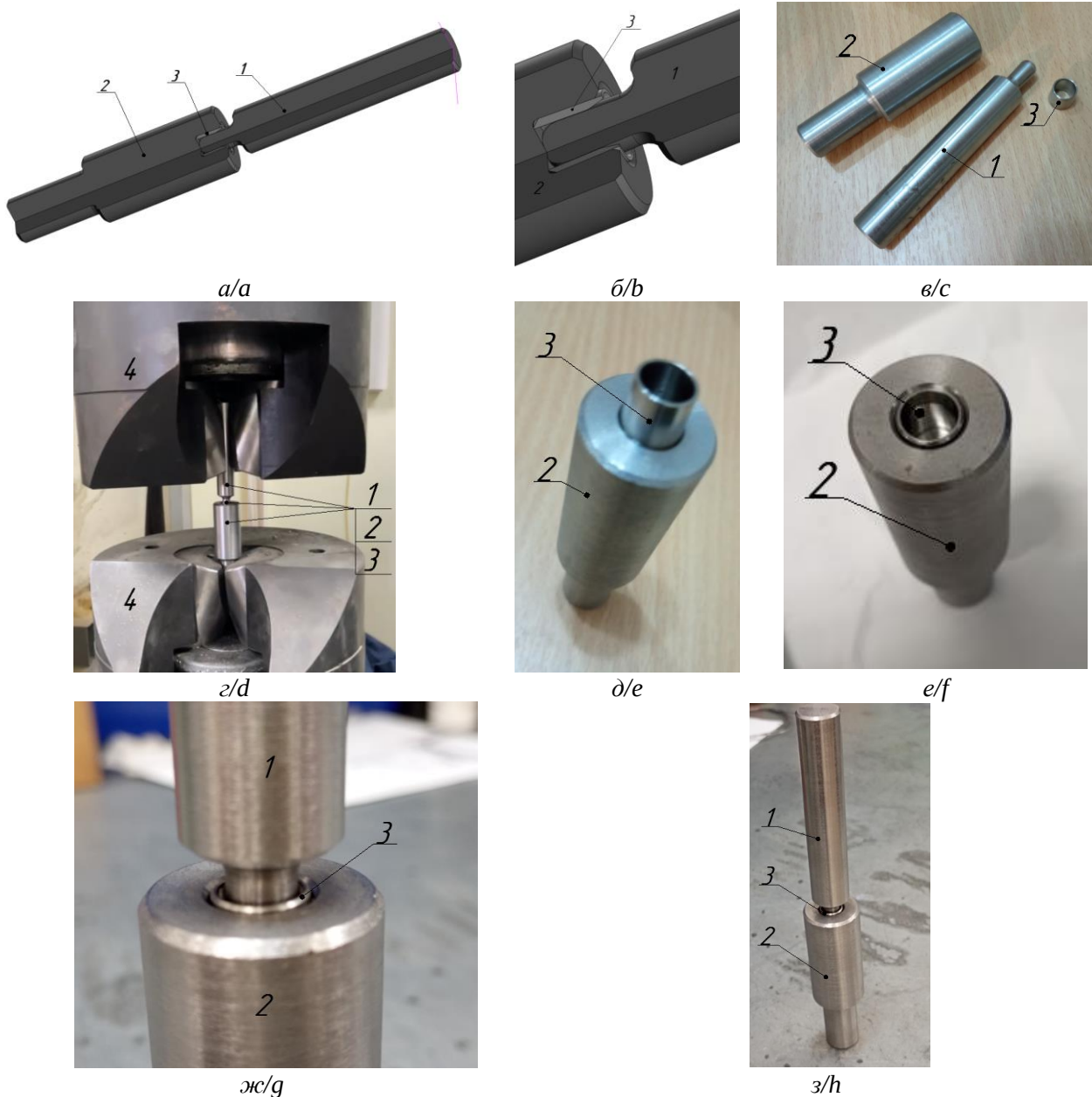


Рис. 5. а, б) 3D-модель оснастки в сборе; в) элементы изготовленной оснастки до монтажа; г) оснастка в сборе, установленная в захваты испытательной машины на растяжение Instron 8801; д–з) этапы сборки оснастки; 1 – оснастка 1 (имитация штыревого элемента); 2 – оснастка 2 (имитация шарошки с посадочным отверстием); 3 – переходная фиксирующая втулка, изготовленная из сплава с эффектом памяти формы; 4 – захваты испытательной машины на растяжение Instron 8801

Fig. 5. а, б) 3D model of the assembled equipment; в) elements of manufactured equipment before installation; г) assembled equipment installed in the grips of the Instron 8801 tensile testing machine; д–з) stages of assembly of equipment; 1 – equipment 1 (imitation of a pin element); 2 – equipment 2 (imitation of a roller cutter with a mounting hole); 3 – transitional fixing sleeve made of an alloy with shape memory effect; 4 – grips of tensile testing machine Instron 8801

Испытания проводились при комнатной температуре. Это сделано для установления минимально необходимого усилия для выпрессовки оснастки 1 (имитация штыревого элемента) и втулки со штыревым элементом из оснастки 2 (имитация шарошки), когда сплав находится в мартенситном фазовом состоянии. Стоит отметить, что оснастка 1 и оснастка 2 были изготовлены из стали 40Х, после

изготовления была проведена термообработка – закалка. Размеры всех элементов до испытаний и монтажа, после и на всех этапах монтажа контролировались с помощью стационарного 3D-сканера со структурированным подсветом RangeVision DIY и с использованием камер Daheng с обеспечением точности измерения 0,02 мм.

Проводимые исследования показали, что усилие запрессовки промежуточной фиксирующей втулки в посадочное отверстие оснастки 2 составляет 500 Н, а последующая запрессовка штыревого элемента оснастки 1 в установленную в оснастку 2 втулку, изготовленную из сплава с эффектом памяти формы, потребовала затраты усилия в 700 Н.

Последующие испытания сборной оснастки с промежуточной фиксирующей втулкой, изготовленной из сплава с ТУФП, на испытательной машине при комнатной температуре (сплав находился в мартенситном фазовом состоянии) с углом наклона образующей конуса к оси равным 3° , показали, что затрачиваемое усилие для выпрессовки зуба равно 1,5–1,6 кН. В то же время, применяемая для данных размеров посадка с гарантированным натягом H9/z11 имеет значения для выпрессовки в диапазоне 0,8–1,5 кН. Это позволяет однозначно сказать о повышении надежности фиксации зубьев в теле шарошки с использованием промежуточных фиксирующих втулок, изготовленных из сплавов с ТУФП.

Выводы и рассуждения

Из проведенного эксперимента был сделан вывод, что оптимальная установка зубьев в шарошку долота представляет собой следующие этапы:

- впрессовка стакана или втулки в отверстие, имеющее форму обратного конуса, шарошки долота;
- нагрев до температуры 110–120 °С с выдержкой 3–5 минут для обеспечения полного фазового перехода материала из мартенситного состояния в аустенитное по всему сечению втулки, изготовленной из материала с ТУФП, восстановление формы после впрессовки;
- охлаждение до комнатной температуры для снижения затрачиваемого усилия, необходимого для впрессовки штыревого элемента (зуба) во втулку, установленную в шарошку, так как физико-механические характеристики сплава с ТУФП в мартенситном состоянии ниже, чем в аустенитном;
- впрессовка штыревого элемента (зуба) конической формы во втулку, установленную в отверстие долота;
- повторный нагрев до температуры 110–120 °С с выдержкой 3–5 минут для обеспечения полного фазового перехода материала из мартенситного в аустенитное по всему сечению втулки, изготовленной из материала с ТУФП, восстановление заданной формы втулки после впрессовки в нее штыревого элемента.

На рис. 6 показана предлагаемая конструкция шарошечного долота штыревого типа и конструктивные особенности используемого переходного

фиксирующего элемента, изготовленного из сплава с ТУФП (угол наклона конуса $2\alpha=6^\circ$ или относительно осевой линии $\alpha=3^\circ$).

При этом стоит отметить, что во время эксплуатации температура на рабочих элементах шарошечного долота, при которой данный сплав находится в аустенитном фазовом состоянии, имеющем повышенные физико-механические характеристики в сравнении с мартенситным состоянием, достигает 200 °С. Это позволяет предположить, что затрачиваемое усилие для выпрессовки зуба из втулки, когда она будет в аустенитном фазовом состоянии, потребует значительно больших усилий [17–20]. При этом усилие, необходимое для вырыва зуба, можно значительно повысить и для втулки в мартенситном фазовом состоянии за счет увеличения угла наклона образующей конуса к оси на всех элементах сопряжения.

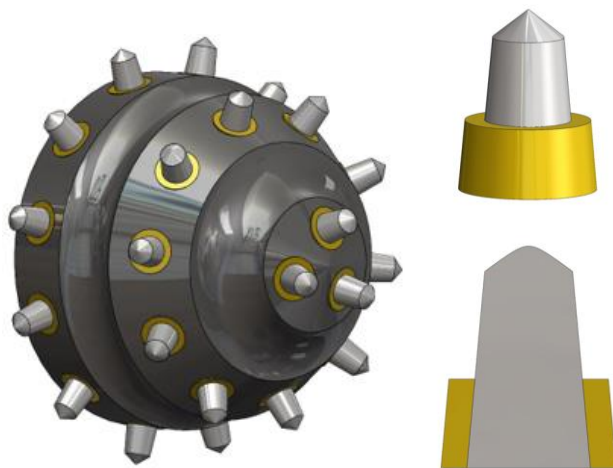


Рис. 6. Компьютерная модель предлагаемой конструкции шарошки, зуба и промежуточного элемента (втулка)

Fig. 6. Computer model of the proposed design of a cutter, tooth and intermediate element (bushing)

Также при нагреве после запрессовки втулки и оснастки в другую оснастку было замечено явление самопозиционирования при фазовом переходе. Это можно объяснить восстановлением формы изделия и возникающими возвратными силами при возникающих внутренних напряжениях при мартенсит-аустенитном фазовом превращении, стремящихся вернуть первоначальную форму деформированной в результате запрессовки втулки. Таким образом, обеспечение точности позиционирования деталей сборочной единицы на примере зуб-втулка-отверстие возможно за счет явления самопозиционирования, проявляемого при восстановлении формы деталей, изготовленных из сплавов с ЭПФ.

Заключение

На основании проведенных испытаний был сделан вывод, что подобранные метод монтажа, материал и конструкция позволят увеличить надежность фиксации твёрдосплавных зубьев и, как следствие, проходку на одно долото и уменьшить риск нештатной ситуации. Это, в свою очередь, сократит материальные и временные затраты,кладываемые на этапе разработки проекта строительства скважин.

Для обеспечения проявления эффекта самопозиционирования сборочной единицы с элементами, изготовленными из сплавов с ЭПФ, предлагается использовать ряд конструктивных особенностей:

- уход от резких переходов к более плавным;
- замену фасок и внешних углов на скруглённые или по кривой с переменным радиусом;
- замену внутренних углов на галтели или на кривые с переменным радиусом;
- чистоту поверхности и отсутствие заусенцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. James R.D., Hane K.F. Martensitic transformations and shape-memory materials // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48. – P. 197–222.
2. Culshaw B. *Smart structures and materials*. – Boston: Artech House, 1996. – 207 p.
3. Волик Д.А. Буровые породоразрушающие инструменты. – М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2014. – 94 с.
4. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин. – М.: ООО «Недра – Бизнесцентр», 2002. – 632 с.
5. Палий П.А., Корнеев К.Е. Буровые долота. – М.: Изд-во «Недра», 1971. – 446 с.
6. Вержанский А.П., Махненко А.Н. Повышение стойкости буровых долот путем создания требуемого натяга при запрессовке твердосплавных зубцов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011. – S3. – С. 349–352.
7. Шарошка бурового долота: пат. № 220909, Российская Федерация, U1; заявл. 15.06.2023; опубл. 11.10.2023. Бюл. № 29. – 13 с.
8. Шарошка бурового долота: пат. № 220881, Российская Федерация, U1; заявл. 15.06.2023; опубл. 09.10.2023. Бюл. № 28. – 13 с.
9. Wei Z.G., Sandstrom R., Miyazaki S. Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems: Part I Shape-memory materials // *Journal of Materials Science*. – 1998. – Vol. 33. – P. 3743–3762.
10. Duerin T.M. *Engineering aspects of shape memory alloys*. – London: Butterworth-Heinemann, 1990. – 394 p.
11. Расчет и выбор посадок с натягом: методические указания к лабораторно-практической работе по дисциплине «Взаимозаменяемость и технические измерения» / А.И. Аристов, Е.Б. Малышева, О.В. Селиверстова, И.Д. Сергеев, Д.С. Фатюхин, А.Е. Шеина, О.В. Яндулова. – М.: МАДИ, 2017. – 28 с.
12. Duerig T.W., Pelton A.R., Bhattacharya K. The measurement and interpretation of transformation temperatures in nitinol // *Shap. Mem. Superelasticity*. – 2017. – Vol. 3. – P. 485–498. DOI: 10.1007/s40830-017-0133-0.
13. Yan L., Liu Y. Effect of deformation mode on the wear behavior of NiTi // *Shape Memory Alloys. Shap. Mem. Superelasticity*. – 2016. – Vol. 2. – P. 204–217. DOI: 10.1007/s40830-016-0070-3.
14. Mahtabi M.J., Shamsaei N. Fatigue modeling for superelastic NiTi considering cyclic deformation and load ratio effects // *Shap. Mem. Superelasticity*. – 2017. – Vol. 3. – P. 250–263. DOI: 10.1007/s40830-017-0115-2.
15. Yan L., Liu Y. Wear behavior of austenitic NiTi shape memory alloy // *Shap. Mem. Superelasticity*. – 2015. – Vol. 1. – P. 58–68. DOI: 10.1007/s40830-015-0008-1.
16. Effect of heat treatment time and temperature on the microstructure and shape memory properties of nitinol wires / N. Agarwal, M.J. Ryan, T.S. Hashemi, T. Mossop, D. O'Neill, J. Power, A. Shayegh, D. Brabazon // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – № 6480. – P. 1–16.
17. Robertson S.W. On the mechanical properties and microstructure of nitinol for biomedical stent // *Applications*. No. LBNL-62454. – Berkeley, CA (United States): Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), 2006. – 108 p.
18. Low-cost and rapid shaping of nitinol for medical device prototyping / M. Yip, S. Alaie, E. Romito, T. Doshi, M. Amiri, A. Amir, B. Mosadegh, S. Dunham // *ASME Open Journal of Engineering*. – 2023. – Vol. 2. – P. 021027. DOI: 10.1115/1.4062282.
19. Romancik J., Vagaš M., Majercak O. Design, implementation, and testing of a 3d-printed gripper actuated by nitinol springs // *Mm Science Journal*. – 2024. – Vol. 7356. – P. 7352. DOI: 10.17973/Mmsj.2024_06_2024009.
20. Durante F., Raparelli T., Zobel Z.B. Three-degree-of-freedom cable-driven parallel manipulator with self-sensing nitinol actuators // *Robotics*. – 2024. – Vol. 13. – № 6. – P. 1–19.

Информация об авторах

Эйтибар Юсиф Оглы Балаев, старший научный сотрудник кафедры нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна, Институт нефти, газа и энергетики, Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, balaev1122@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5736-302X>

Михаил Анатольевич Самарин, инженер кафедры нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна, Институт нефти, газа и энергетики, Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2, samarin1901@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-9194-0513>

Никита Андреевич Шостак, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна, Институт нефти, газа и энергетики, Кубанский государственный технологический университет, Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2; инженер научно-исследовательской части, Кубанский государственный университет, Россия, 350040 г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149, <https://orcid.org/0000-0001-6220-9633>, nikeith@mail.ru

Поступила в редакцию: 08.07.2024

Поступила после рецензирования: 07.10.2024

Принята к публикации: 30.06.2025

REFERENCES

1. James R.D., Hane K.F. Martensitic transformations and shape-memory materials. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48, pp. 197–222.
2. Culshaw B. *Smart structures and materials*. Boston, Artech House, 1996. 207 p.
3. Volik D.A. *Drilling rock-crushing tools*. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) Publ., 2014. 94 p. (In Russ.)
4. Basarygin Yu.M., Bulatov A.I., Proselkov Yu.M. *Drilling of oil and gas wells*. Moscow, Nedra – Businesscenter LLC Publ., 2002. 632 p. (In Russ.)
5. Paliy P.A., Korneev K.E. *Drilling bits*. Moscow, Nedra Publ., 1971. 446 p. (In Russ.)
6. Verzhansky A.P., Makhnenko A.N. Increasing the durability of drill bits by creating the required tension when pressing carbide teeth. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. S3, pp. 349–352. (In Russ.)
7. Balaev E.U., Samarin M.A., Klepikov D.A., Shistak N.A. *Drill bit ball*. Patent RF, no. 220909, 2023. (In Russ.)
8. Balaev E.U., Samarin M.A., Klepikov D.A., Shistak N.A. *Drill bit ball*. Patent RF, no. 220881, 2023. (In Russ.)
9. Wei Z.G., Sandstrom R., Miyazaki S. Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems: Part I Shape-memory materials. *Journal of Materials Science*, 1998, vol. 33, pp. 3743–3762.
10. Duerin T.M. *Engineering aspects of shape memory alloys*. London, Butterworth-Heinemann, 1990, 394 p.
11. Aristov A.I., Malysheva E.B., Seliverstova O.V., Sergeev I.D., Fatyukhin D.S., Sheina A.E., Yandulova O.V. *Calculation and selection of tight landings: methodological guidelines for laboratory and practical work on the discipline "Interchangeability and technical measurements"*. Moscow, MADI Publ., 2017. 28 p. (In Russ.)
12. Duerig T.W., Pelton A.R., Bhattacharya K. The measurement and interpretation of transformation temperatures in nitinol. *Shap. Mem. Superelasticity*, 2017, vol. 3, pp. 485–498.
13. Yan L., Liu Y. Effect of deformation mode on the wear behavior of NiTi. *Shape Memory Alloys. Shap. Mem. Superelasticity*, 2016, vol. 2, pp. 204–217.
14. Mahtabi M.J., Shamsaei N. Fatigue modeling for superelastic NiTi considering cyclic deformation and load ratio effects. *Shap. Mem. Superelasticity*, 2017, vol. 3, pp. 250–263.
15. Yan L., Liu Y. Wear behavior of austenitic NiTi shape memory alloy. *Shap. Mem. Superelasticity*, 2015, vol. 1, pp. 58–68.
16. Agarwal N., Ryan M.J., Hashemi T.S., Mossop T., O'Neill D., Power J., Shayegh A., Brabazon D. Effect of heat treatment time and temperature on the microstructure and shape memory properties of nitinol wires. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 6480, pp. 1–16.
17. Robertson S.W. *On the mechanical properties and microstructure of nitinol for biomedical stent. Applications*. Berkeley, CA (United States), Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), 2006, No. LBNL-62454.
18. Yip M., Alaie S., Romito E., Doshi T., Amiri M., Amir A., Mosadegh B., Dunham S. Low-cost and rapid shaping of nitinol for medical device prototyping. *ASME Open Journal of Engineering*, 2023, vol. 2, 021027 p.
19. Romancik J., Vagaš M., Majercak O. Design, implementation, and testing of a 3d-printed gripper actuated by nitinol springs. *Mm Science Journal*, 2024, vol. 7356, 7352 p.
20. Durante F., Raparelli T., Zobel Z.B. Three-degree-of-freedom cable-driven parallel manipulator with self-sensing nitinol actuators. *Robotics*, 2024, vol. 13, no. 6, pp. 1–19.

Information about the authors

Etibar Y.O. Balaev, Senior Researcher, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya street, Krasnodar, 350072, Russian Federation, balaev1122@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5736-302X>

Mikhail A. Samarin, Engineer, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya street, Krasnodar, 350072, Russian Federation, samarin1901@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-9194-0513>

Nikita A. Shostak, Cand. Sc., Associate Professor, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya street, Krasnodar, 350072, Russian Federation; Research Engineer, Kuban State University, 149, Stavropolskaya street, Krasnodar, 350040, Russian Federation, nikeith@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6220-9633>

Received: 08.07.2024

Revised: 07.10.2024

Accepted: 30.06.2025