

УДК 669.18:669.01:539.3

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.113.17

## СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ СКЛОННОСТИ СТАЛЬНЫХ РЕЗЬБОВЫХ КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К ДЕФОРМАЦИОННОМУ СТАРЕНИЮ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.ИВЧЕНКО А. В.<sup>2\*</sup>, к.т.н., с.н.с.КОНДРАТЕНКО П. В.<sup>3\*</sup>, асс.ЧМЕЛЕВА В. С.<sup>4\*</sup>, к.т.н., доц.ПЕРЧУН Г.И.<sup>5\*</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst\_2000@mail.ru, ORCID 0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: achriman@yandex.ua, ORCID 0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup>Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail:kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

<sup>5\*</sup> Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: perchun\_galina@ukr.net, ORCID 0000-0001-9013-4659

**Аннотация.** Цель. Поскольку холоднодеформированные болты, как правило, не содержат легирующих элементов, эффективно уменьшающих интенсивность деформационного старения, то протекающие процессы естественного деформационного старения и возможного искусственного деформационного старения могут приводить к снижению сопротивления как вязкому, так и хрупкому разрушению. Основываясь на анализе существующих методов определения склонности к деформационному старению стальных изделий, обоснована целесообразность применения для холоднодеформированных изделий структурного способа для снижения склонности к старению, который также обеспечит повышение комплекса механических характеристик без дополнительного легирования. **Методика.** В качестве материала для настоящего исследования были выбраны болты М12х1,75х70 класса прочности из стали 20кп. Исследовались структура и механические свойства болтов после различных видов обработок. **Результаты.** Для стальных изделий, получаемых и эксплуатируемых в холоднодеформированном состоянии, предложен способ, обеспечивающий одновременно повышение комплекса их механических свойств и практический иммунитет к деформационному старению. **Научная новизна.** Предложен новый способ уменьшения склонности к деформационному старению холоднодеформированных стальных изделий: крепёжных изделий, полученных холодной объёмной штамповкой. Данный способ отличается от известных тем, что если в известном структурном способе определённый (благоприятный) тип дислокационной структуры при заданном деформационном воздействии при эксплуатации обусловлен ранее созданным определённым исходным структурным состоянием, то в предлагаемом способе для стальных изделий, у которых негативное влияние деформационного старения обусловлено дислокационной структурой, сформированной в них технологической активной холодной деформацией, получение благоприятной дислокационной структуры достигается преобразованием исходной структуры за счёт температурных и циклических деформационных воздействий. **Практическая значимость.** Понимание механизмов структурных изменений и получение количественных закономерностей, описывающих процесс деформационного старения стальных изделий полученных холодной деформацией.

**Ключевые слова:** деформационное упрочнение, холодная деформация, старение, крепежные изделия, дислокационная структура, циклическая деформация, термическое воздействие

## СПОСОБИ ЗНИЖЕННЯ СХИЛЬНОСТІ СТАЛЕВИХ РІЗЬБОВИХ КРІПІЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДО ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАРІННЯ

ГУЛЬ Ю. П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.ИВЧЕНКО О. В.<sup>2\*</sup>, к.т.н., с.н.с.КОНДРАТЕНКО П. В.<sup>3\*</sup>, ас.ЧМЕЛЬОВА В. С.<sup>4\*</sup>, к.т.н., доц.ПЕРЧУН Г.И.<sup>5\*</sup>, к.т.н., доц.

<sup>1</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагарина, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst\_2000@mail.ru, ORCID0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: achriman@yandex.ua, ORCID0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup>Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

<sup>5\*</sup> Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: perchun\_galina@ukr.net, ORCID 0000-0001-9013-4659

**Анотація. Мета.** Оскільки холоднодеформовані болти, як правило, не містять легуючих елементів, ефективно зменшують інтенсивність деформаційного старіння, то протікають процеси природного деформаційного старіння і можливого штучного деформаційного старіння можуть призводити до зниження опору як грузлому, так і крихкому руйнуванню. Грунтуючись на аналізі існуючих методів визначення схильності до деформаційного старіння сталевих виробів, обґрунтовано доцільність застосування для холоднодеформованих виробів структурного способу для зниження схильності до старіння, який також забезпечить підвищення комплексу механічних характеристик без додаткового легування. **Методика.** Як матеріал для цього дослідження були обрані болти M12x1,75x70 класу міцності зі сталі 20кп. Досліджувалися структура і механічні властивості болтів після різних видів обробок. **Результати.** Для сталевих виробів, одержуваних і експлуатованих в холоднодеформованому стані, запропонований спосіб, що забезпечує одночасно підвищення комплексу їх механічних властивостей і практичний імунітет до деформаційного старіння. **Наукова новизна.** Запропоновано новий спосіб зменшення схильності до деформаційного старіння холоднодеформованих сталевих виробів: кріпильних виробів, отриманих холодного об'ємного штампуванням. Даний спосіб відрізняється від відомих тим, що якщо в відомому структурному способі певний (сприятливий) тип дислокаційної структури при заданому деформаційному впливі при експлуатації обумовлений раніше створеним певним вихідним структурним станом, то в запропонованому способі для сталевих виробів, у яких негативний вплив деформаційного старіння обумовлене дислокаційною структурою, сформованою в них технологічною активною холодною деформацією, отримання сприятливою дислокаційною структурою досягалося перетворенням вихідної структури за рахунок температурних і циклічних деформаційних впливів. **Практична значимість.** Розуміння механізмів структурних змін та отримання кількісних закономірностей, що описують процес деформаційного старіння сталевих виробів отриманих холодною деформацією.

**Ключові слова:** деформаційне зміцнення, холодна деформація, старіння, кріпильні вироби, дислокаційна структура, циклічна деформація, термічний вплив

## METHODS OF REDUCING THE STRENGTH OF STEEL THREADED FASTENING ELEMENTS TO THE DEFORMATION AGING

GUL Yu. P.<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Associate professor

IVCHENKO A. V.<sup>2\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Senior Research Officer

KONDRATENKO P. V.<sup>3\*</sup>, Graduate student

CHMELEVA V. S.<sup>4\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Associate professor

PERCHUNG. I.<sup>5\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Associate professor

<sup>1</sup>Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID0000-0003-3754-7731

<sup>2\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst\_2000@mail.ru, ORCID0000-0002-4518-1744

<sup>3\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: achriman@yandex.ua, ORCID 0000-0003-2242-3496

<sup>4\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

<sup>5\*</sup> Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: perchun\_galina@ukr.net, ORCID 0000-0001-9013-4659

**Annotation. Purpose.** Since cold-deformed bolts, as a rule, do not contain alloying elements that effectively reduce the intensity of deformation aging, the ongoing processes of natural deformation aging and possible artificial deformation aging can lead to a decrease in resistance to both viscous and brittle fracture. Based on the analysis of existing methods for determining the propensity to deformation aging of steel products, the expediency of using a structural method for cold-deformed articles to reduce the propensity to aging is justified, which will also ensure an increase in the complex of mechanical characteristics without additional alloying. **Methodology.** As a material for this study, M12x1.75x70 bolts of strength class of 20kp steel were chosen. The structure and mechanical properties of bolts after various treatments were investigated. **Findings.** For steel products produced and operated in a cold-deformed state, a method is proposed that simultaneously increases the complex of their mechanical properties and practical immunity to deformation aging. **Originality.** A new method for reducing the propensity to deformation aging of cold-deformed steel products is proposed: fasteners obtained by cold volume stamping. This method differs from the known ones in that if in a known structural method a certain (favorable) type of dislocation structure for a given deformation effect during operation is due to a

previously created certain initial structural state, then in the proposed method for steel products, in which the negative effect of deformation aging is due to a dislocation structure, formed in them by technological active cold deformation, obtaining a favorable dislocation structure up to is transformed by the transformation of the original structure due to temperature and cyclic deformation effects. **Practical value.** Understanding the mechanisms of structural changes and obtaining quantitative patterns describing the process of deformation aging of steel products obtained by cold deformation.

**Keywords:** deformation hardening, cold deformation, aging, fasteners, dislocation structure, cyclic deformation, thermal action

### Введение

Под склонностью стальных изделий к деформационному старению (ДС) понимается:

а) абсолютное или относительное изменение соответствующих механических характеристик: сопротивления деформации ( $\sigma$ ), пластичности ( $\delta$ ), сопротивления разрушению как хрупкому, так и вязкому по сравнению с деформированным (без старения) состоянием;

б) сохранение или несохранение в ДС-состоянии абсолютных значений, указанных механических свойств на уровне не ниже значений, предусмотренных действующими стандартами на данный вид металлопродукции.

По пункту, а). Чем больше указанное изменение ( $\Delta$ ), тем выше склонность данного объекта к ДС, т. е. выше нестабильность его свойств во времени, в том числе времени эксплуатации стальных изделий. Обычно по характеристикам сопротивления деформации  $\Delta > 0$ , а по остальным  $\Delta < 0$ . Как правило, устанавливается предельно допустимое изменение  $|\Delta|$ , определяющее стабильное механическое поведение стального изделия или полуфабриката под нагрузкой. При этом для стальных изделий это  $\Delta$  устанавливается по  $\Delta$  сопротивлению хрупкому разрушению и  $\Delta$  сопротивлению вязкому разрушению, а для стальных полуфабрикатов (например, для холоднокатаного листа или круглых заготовок – для холодной штамповки) – по всем трём группам механических свойств:  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta\delta$ ,  $\Delta$  сопротивление разрушению, или выбирается ведущая характеристика, определяющая технологическую деформируемость данного стального полуфабриката. Для стальных изделий значение  $\Delta_{\text{доп}}$  (допустимые) связывают со временем его достижения в процессе ДС  $\tau_{\text{ДС}}$  и с заданным гарантированным временем эксплуатации  $\tau_{\text{ДС}}^{\Delta_{\text{доп}}} \geq \tau_{\text{э}}$ . В противном случае требуется либо замена стали, либо сокращение гарантированного срока эксплуатации. Для стальных полуфабрикатов ситуация подобна, но вместо  $\tau_{\text{э}}$   $\tau_{\text{ДС}}^{\Delta_{\text{доп}}}$  сравнивается время вылёживания их до технологической деформации  $\tau_{\text{в}}$ .  $\tau_{\text{ДС}}^{\Delta_{\text{доп}}} \geq \tau_{\text{в}}$ . Однако для стальных полуфабрикатов имеются большие возможности соблюдения пригодности стали для технологической деформации без её (стали) замены: увеличением значения  $\tau_{\text{ДС}}^{\Delta_{\text{доп}}}$  за счёт снижения температуры хранения полуфабрикатов или за счёт сокращения  $\tau_{\text{в}}$  (улучшение производственной логистики).

По пункту б): склонность к ДС считается допустимой, если ДС по специальному режиму после смоделированной холодной деформации образца

данной стали (обычно до 10 % растяжением или сжатием) или после технологической деформации, формирующей стальной полуфабрикат или изделие, сохраняет необходимый уровень технологической пластичности или сопротивления разрушению. Считается, что отмеченные уровни сохранения свойств в ДС-состоянии получены на основе обширной статистики практики технологической деформации со стальными полуфабрикатами или эксплуатации стальных изделий, а используемые режимы ДС в максимально возможной степени снижают технологическую пластичность и сопротивление разрушению. В последнем приходится усомниться, так как экспериментально показано, что 10%-ная деформация образцов по разным схемам при постоянной температуре и длительности ДС даёт существенное различие в снижении сопротивления хрупкому и вязкому разрушению [1–2], а при постоянной схеме и степени деформации минимальный уровень сопротивления разрушению соответствует различным температурам ДС в зависимости от исходного – перед деформацией – структурного состояния стали [3]. Поэтому наиболее близких к действительным результатам склонности к ДС следует ожидать в случае использования в качестве объектов испытания – натуральных изделий или их представительных частей. Например, крепёжных изделий, полученных холодной объёмной штамповкой или отрезков арматурных стержней, полученных и упрочнённых холодной деформацией в производственных условиях. При этом первая составная часть режима ДС: холодная деформация полностью соответствует реальной в данных стальных изделиях, а режим собственно старения: температура и длительность подлежат варьированию, для установления параметров наибольшего как отрицательного, так, возможно, и положительного влияния ДС на свойства таких стальных изделий.

Особо следует отметить, что по имеющейся информации существующие методики определения склонности к ДС [4–6] фактически определяют обычно склонность данной стали к ДС, но не стальных изделий той или иной геометрии из данной стали. Так, например, склонность к ДС толстолистового проката (по значению KCU (KCV) в ДС-состоянии) различной толщины до 50–100 мм и выше определяют на стандартных образцах максимальной толщины 10 мм. А ведь давно установлено, что с увеличением толщины, значения KCU (KCV) падают, а температура хладноломкости растёт. При определении ударной вязкости толстого

листа падающим грузом толщины образцов соответствуют толщине листа, но не в методике определения склонности к ДС.

Установленные в стандартах режимы ДС как по степеням деформации, так и по температурам и длительности последующего старения, стандартизованы, что уже отмечалось выше, давно и в определённой степени произвольно, без учёта не только различных конкретных условий ДС для различных стальных полуфабрикатов и изделий, но и различного химического состава стали и различного структурного состояния стальных изделий. Например, для различного рода проката, используемого в конструкциях, в том числе строительных, стандартизован такой режим ДС, как деформация 10 % (растяжением или сжатием) + старение при 250 °С, 0,5–1 час, в то время, когда прокатные изделия применяли, как правило, в горячекатаном состоянии. Но сейчас значительный и всё растущий объём арматуры, толстого листа, труб, фасонных профилей используется в термически упрочнённом состоянии. Значительно расширена и номенклатура марок стали. Эксплуатационные нагрузки стальных изделий стали более интенсивными и разнообразными, что также требует соответствующего учёта в методиках определения склонности к ДС. Во всех методиках рассмотрения склонности к ДС определяются соответствующие свойства только при ДС в разгруженном состоянии, в то время как если этого достаточно для стального полуфабриката, то для стального изделия необходимо определение свойств при ДС под нагрузкой, обеспечивающей уровень напряжений, соответствующий эксплуатационным. Особо следует выделить класс стальных изделий, изготавливаемых холодной деформацией и эксплуатирующихся в холоднодеформированном структурном состоянии: арматура, крепёж и др. В этом случае подлежат учёту: а) ДС стальных полуфабрикатов, используемых как заготовки для производства стальных изделий, после холодной деформации при калибровке и правке, до технологической деформации; б) ДС стальных изделий после изготовления до эксплуатации; в) ДС в процессе эксплуатации под монтажными и эксплуатационными нагрузками.

Отличительными особенностями методик определения склонности к ДС рассматриваемых стальных изделий является то обстоятельство, что холоднодеформированное структурное состояние этих объектов создаётся реальными деформационными воздействиями в технологическом процессе их изготовления, а моделирования требуют только нагрузки на этапе в). Обеспечивается также соответствие испытываемых объектов реальным по геометрии. Таким образом, методика определения склонности к ДС стальных изделий рассматриваемого класса может быть максимально приближена к фактическому изменению свойств этих стальных изделий в

результате ДС. Адекватная методика определения склонности к ДС различных стальных изделий из различных марки сталей подлежит использованию не только для фиксации уровня СДС (склонности к ДС) и определения пригодности (непригодности) данного стального изделия и стали, из которого оно изготовлено, по рассматриваемому свойству (степени стабильности свойств), но и при разработке способов уменьшения СДС стальных изделий и полуфабрикатов.

Можно говорить о двух основных способах снижения интенсивности ДС и его негативного влияния на свойства стальных изделий. Первый можно условно назвать «химическим» способом, который основан на уменьшении эффективной концентрации атомов С+N (Сэфф), которые могут блокировать дислокации при ДС. Это практически достигается легированием стали сильными нитридо- и карбидообразователями: Al, Cr, V, Nb, Ti в сочетании со специальной термической обработкой (в зависимости от типа легирующего элемента) и сосредоточения таким образом основной массы (С+N) в специальных нитридах, карбидах и карбонитридах. В перечисленных фазах энергия связи атомов (С+N) с соответствующими легирующими элементами существенно выше, чем энергия связи указанных атомов с дислокациями. Остающейся концентрации (С+N) в других источниках (Сэфф << 10<sup>-4</sup> % по массе) недостаточно для эффективной блокировки дислокаций. Легирование стали Ni и Co уменьшает интенсивность ДС за счёт снижения энергии связи (С+N) с дислокациями, но при введении Ni и Co в значительных количествах, что исключает их применение для массовых стальных изделий, непомерно удорожая их. Перечисленные ранее легирующие элементы также приводят к некоторому удорожанию стальных изделий, а также не всегда обеспечивают эффект при повышенных температурах ДС. Сравнительно недорогие присадки Cr и особенно Ti могут почти полностью устранить процесс ДС, но при нужных для этого количествах приводят к недопустимому упрочнению и падению пластичности феррита.

Второй способ относится не столько к уменьшению интенсивности ДС, фиксируемому, например, по свойствам при статическом растяжении, сколько к сохранению на необходимом уровне характеристик сопротивления разрушению в ДС-состоянии [7]. Поскольку это достигается формированием в стальном изделии определённого структурного состояния перед холодной деформацией, а после – определённой дислокационной субструктуры – второй способ можно назвать структурным. В экспериментальных, в том числе производственных условиях, показана его эффективность при получении различных структурных состояний перед холодной деформацией: мелкое зерно феррита не менее 7 балла [8–10], термическое упрочнение низкоуглеродистой нелегированной стали при

скоростях охлаждения 30–40 град/с [8], вакансионная закалка технического железа с получением определённой неравновесной концентрации вакансий [11], СС после термомеханикотермической обработки труб, сформированное термическим упрочнением, холодной деформацией и стабилизирующим отпуском (высокотемпературным ДС) [12]. Структурный способ снижения склонности к ДС не требует изменения химического состава стали. В некоторых случаях недопущение вредного влияния ДС на свойства стальных изделий достигается исключением условий для данного вида ДС из технологического процесса. Так, температура правки горячекатаных труб 200–350 °С создавала условия для динамического ДС (ДДС) стали. В результате трубы из низкоуглеродистой стали не проходили сдаточных испытаний по твёрдости, а из среднеуглеродистой – обсадные трубы – гидравлических испытаний: раскрывались трещины, образовавшиеся в процессе правки в интервале температур динамического ДСС. Вывод температур правки из этого интервала путём охлаждения труб перед правкой устранило виды брака, указанные выше [13–14]. В итоге в соответствующих технологических инструкциях трубных заводов Украины предусмотрено, что температура правки горячекатаных труб не должна превышать 100 °С.

### Цель

Поскольку холоднодеформированные болты, как правило, не содержат легирующих элементов, эффективно уменьшают интенсивность деформационного старения, то протекая процессы естественного деформационного старения и возможного искусственного деформационного старения могут приводить к снижению сопротивления как вязкой, так и хрупкому разрушению. Кроме того, холоднодеформированное состояние болтов, особенно при неравномерном распределении накопленной в результате холодной деформации упругой энергии, что характерно для холодной объемной штамповки, увеличивает подверженность коррозии, в том числе к образованию коррозионных трещин. Основываясь на анализе существующих методов определения склонности к деформационному старению стальных изделий, обоснована целесообразность применения для холоднодеформированных изделий структурного способа снижения склонности к старению, который также обеспечит повышение комплекса механических характеристик без дополнительного легирования.

### Материал

Исследование предлагаемого способа уменьшения склонности к ДС проводилось на болтах М12х1,75х70 класса прочности 5.8 из стали 20кп полученных холодной объемной штамповкой по стандартной технологии ПАО «ДнепрOMETIZ». Для

проведения исследования на ПАО «ДнепрOMETIZ» было отобрано 30 болтов, которые были поделены на 5 партий по шесть болтов в каждой: 1-я партия испытывалась непосредственно в день изготовления, 2-я партия после 3 дней естественного ДС, 3-я партия после 7 дней естественного ДС, 4-я партия после 21 дня естественного ДС, 5-я партия после 120 дней естественного ДС. Каждая партия болтов была поделена две части, первую испытывали в исходном состоянии и после холодной деформации, вторую после холодной деформации и дополнительного низкотемпературного термического воздействия 400 °С. Испытания проводились на испытательной машине FP-100/1, с записью полных диаграмм деформации.

### Методика и результаты

В настоящей статье приводятся результаты термического воздействия. Результаты исследования приведены на рисунках 1–2.

На рисунке 1 приведены зависимости изменения характеристик сопротивления деформации  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  в зависимости от времени ДС, на рисунке 2 – зависимости изменения характеристик пластичности  $\delta_r$  и  $\delta_{общ}$  в зависимости от времени ДС. Как видно из приведенных зависимостей на рисунках 1 и 2, предел прочности и текучести болтов, полученных холодной объемной штамповкой без дополнительного термического воздействия увеличивается на 7 и 11% соответственно, а относительное равномерное и общее удлинение снижается на 24 и 36% соответственно во время вылеживания после изготовления на протяжении 120 дней, что подтверждает факт протекания процессов деформационного старения в болтах полученных холодной деформацией. Дополнительное низкотемпературное термическое воздействие на холоднодеформированные болты позволяет повысить предел прочности и предел текучести (рис. 1), а также позволяет на 15% повысить характеристики пластичности болтов (рис. 2) и сохранить значение характеристик сопротивления деформации и характеристик пластичности на одном уровне на протяжении всего времени ДС.

Особенно важно подчеркнуть, что данный способ не просто обеспечивает сохранение свойств холоднодеформированных стальных изделий, но и сохранение повышенного комплекса механических свойств по сравнению с комплексом свойств после технологической формирующей деформации, в том числе повышенную пластичность и сопротивление разрушению.

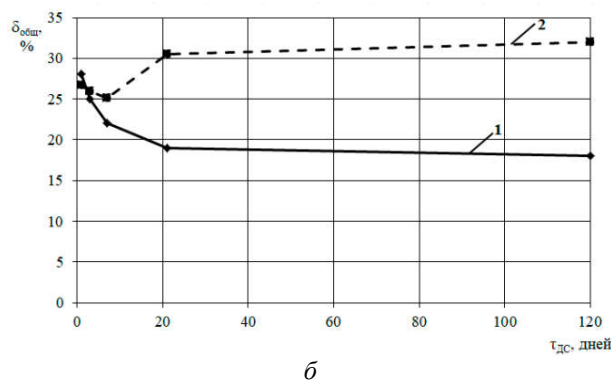
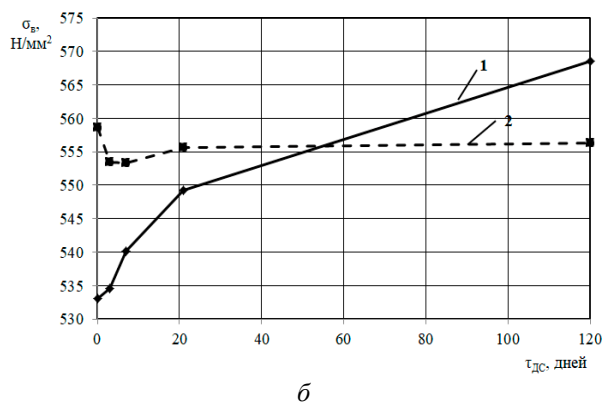
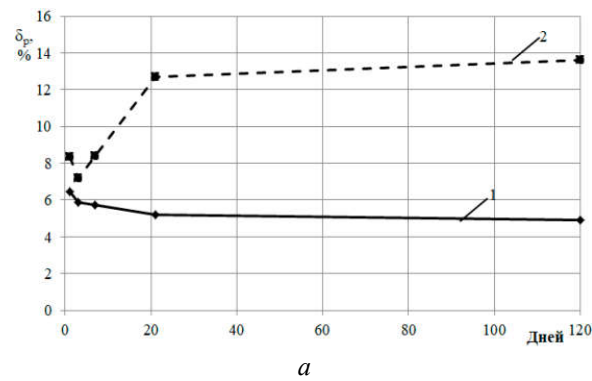
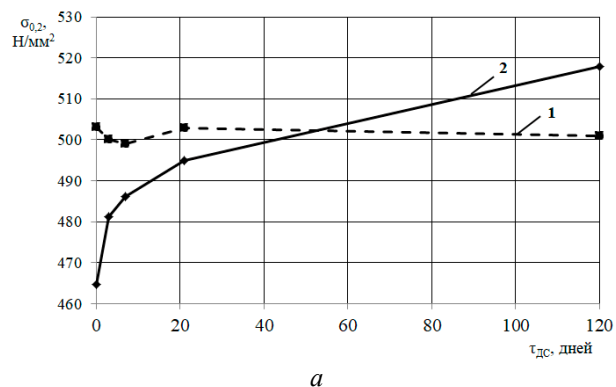


Рис. 1. Зависимость предела текучести (а) и предела прочности (б) болтов класса прочности 5.8 в исходном состоянии после изготовления (1) и после дополнительного термического воздействия (2)/ Dependence of yield strength (a) and tensile strength (b) of bolts of strength class 5.8 in the initial state after manufacturing (1) and after additional thermal impact (2)

Рис. 2. Зависимость относительного равномерного удлинения (а) и относительного общего удлинения (б) болтов класса прочности 5.8 в исходном состоянии после изготовления (1) и после дополнительного термического воздействия (2)/ Dependence of the relative uniform elongation (a) and the relative total elongation (b) of the bolts of strength class 5.8 in the initial state after manufacturing (1) and after additional thermal impact (2)

### Научная новизна и практическая ценность

Предложен новый способ уменьшения склонности к ДС холоднодеформированных стальных изделий: крепёжных изделий, полученных холодной объёмной штамповкой. С одной стороны, этот способ близок к рассмотренному выше структурному способу, т. к. достигается созданием специфического структурного состояния, при котором негативное влияние ДС на свойства стальных изделий или полуфабрикатов в необходимой степени снижается. Но отличие заключается в том, что если в известном структурном способе определённый (благоприятный) тип дислокационной структуры при заданном деформационном воздействии при эксплуатации обусловлен ранее созданным определённым исходным структурным состоянием, то в предлагаемом способе для стальных изделий, у которых негативное влияние ДС обусловлено дислокационной структурой, сформированной в них технологической активной холодной деформацией, получение благоприятной

дислокационной структуры достигается преобразованием исходной структуры за счёт температурных и циклических деформационных воздействий. Эти воздействия имеют релаксационный стабилизирующий характер, вызывая уменьшение запасаемой при технологической активной холодной деформации упругой энергии и её объёмного градиента, перераспределение дислокаций без существенного уменьшения их плотности с формированием однородной дислокационной структуры дислокационных фрагментов с квазиравновесными малоугловыми границами дислокационного строения. Квазиравновесность дислокационных границ определяется большой степенью компенсации полей напряжений дислокаций, что, в свою очередь, снижает энергию блокировки дислокаций атомами (C+N) и уменьшает плотность сегрегаций их на дислокациях. Таким образом, описанная перестройка дислокационной структуры сопровождается снижением интенсивности взаимодействия атомов (C+N) с дислокациями. В совокупности можно

обоснованно ожидать весьма малой интенсивности ДС при последующем низкотемпературном ДС (т. е. при температурах ниже границы температурных воздействий), во всяком случае, в разгруженном состоянии. ДС под нагрузкой в области макроупругой деформации по изменению свойств тоже должно быть выражено слабо, т. к. описанные границы дислокационных фрагментов обладают повышенной механической устойчивостью, а возможное перераспределение точек закрепления дислокаций из-за изменения кривизны «дислокационных линий» даст небольшой эффект.

### Выводы

1. Рассмотрены существующие методы определения склонности к деформационному старению стальных изделий и полуфабрикатов. Предложены

направления их совершенствования с целью приближения к реальным условиям эксплуатации указанных объектов в состаренном состоянии.

2. Показано, что во многих практически важных случаях наиболее перспективным методом снижения склонности к деформационному старению рассматриваемых объектов является структурный метод, который не требует дополнительного легирования, а основан на создании регламентированного структурного состояния.

3. Для стальных изделий, получаемых и эксплуатируемых в холоднодеформированном состоянии, предложен способ, обеспечивающий одновременно повышение комплекса их механических свойств и практический иммунитет к деформационному старению.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Гуль Ю. П. Дислокационная структура и хладостойкость низкоуглеродистой стали / Ю. П. Гуль, А. И. Карнаух // Изв. АН СССР. Металлы. – 1975. – № 3. – С. 140–146.
3. Гуль Ю. П. О методике определения склонности к деформационному старению термически упрочнённой низкоуглеродистой стали / Ю. П. Гуль // Термическое упрочнение проката. – М.: Металлургия, 1970. – № 37. – С. 131–137.
4. ГОСТ 7268-82 Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб. Межгосударственный стандарт. Технические условия.
5. Method for testing metals / F. Garofalo, N. J., Metuchen and G. V. Smith; Ithaca, N. Y., assignors to United States Steel Corporation, a corporation of New Jersey Filed. 1955, Dec. 14. Ser. No. 553,104 3. Claims (Cl. 73–15.4) // United States Patent Office. – 1961, June 6.
6. Способ оценки склонности к деформационному старению термически обработанных стальных длинномерных изделий: пат. № 1077936 (RU): C21D9/52 – для проволоки, лент / И. Д. Костокрызов, А. Г. Комаров; заявл. 25.06.1982; опубл. 07.03.1984. Бюл. № 9/1984.
7. Стародубов К. Ф. Влияние термической обработки на стабильность свойств низкоуглеродистой стали / К. Ф. Стародубов, Ю. П. Гуль // Термическое упрочнение проката. – М.: Металлургия, 1969. – № 30. – С. 32–51.
8. Гуль Ю. П. Влияние скорости охлаждения из аустенитной области на склонность углеродистых сталей к деформационному старению / Ю. П. Гуль, Ю. А. Ключник, В. С. Андриевский, В. А. Хавалджи, Л. А. Переверзева, И. З. Шукис // Термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1980. – № 9. – С. 104–106.
9. Гуль Ю. П. Повышение хладостойкости толстолистовой низкоуглеродистой стали путём термического упрочнения / Ю. П. Гуль, Ю. А. Ключник, Ю. А. Бембинек, М. А. Задорожная, Т. С. Рашба // Сталь. – 1972. – № 5. – С. 441–443.
10. Гуль Ю. П. Ударная вязкость деформационно-состаренной широкополосной стали в зависимости от размера ферритного зерна / Ю. П. Гуль, Р. Я. Рабухина, И. Ю. Белогорцева // Термическая обработка проката. – М.: Металлургия, 1983. – С. 64–66.
11. Гуль Ю. П. Деформационные воздействия в технологиях термической и комбинированной обработки металлопродукции / Ю. П. Гуль // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 2011. – Вып. 58. – С. 29–39.
12. Гуль Ю. П. Влияние деформационного старения на упрочнение и охрупчивание термомеханикотермически упрочнённых низкоуглеродистых сталей / Ю. П. Гуль, И. З. Шукис // Производство термически обработанного проката. – М.: Металлургия, 1986. – С. 22–25.
13. Гуль Ю. П. Оптимизация технологических параметров правки горячекатаных труб из низкоуглеродистой стали / Ю. П. Гуль, Л. И. Тютюнник, О. С. Вильямс, А. Н. Кондратьева, Т. И. Савенкова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1976. – № 5. – С. 29–31.
14. Гуль Ю. П. Влияние температуры правки на свойства труб из среднеуглеродистой стали / Ю. П. Гуль, О. С. Вильямс, В. С. Андриюшенко, В. С. Андриевский, Т. И. Савенкова, Р. Я. Рабухина // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1978. – № 3. – С. 36–37.

## REFERENCES

1. Babich V. K. *Deformatsionnoye starenie stali* [Deformation aging of steel] / V. K. Babich, YU. P. Gul' I. Ye. Dolzhenkov – M.: Metallurgiya [M.: Metallurgy], 1972. – 320 p. (in Russian).
2. Gul' Yu. P. *Dislokatsionnaya struktura i khladostoykost' nizkouglerodistoy stali* [Dislocation structure and cold resistance of low-carbon steel] / YU. P. Gul' A. I. Karnaukh // *Izv. AN SSSR. Metally* [Izv. AN SSSR. Metals.], – 1975. – № 3. – p. 140–146. (in Russian).
3. Gul' Yu. P. *O metodike opredeleniya sklonnosti k deformatsionnomu stareniyu termicheski uprochnonnoy nizkouglerodistoy stali* [On the technique for determining the propensity to deformation aging of thermally strengthened low-carbon steel] / YU. P. Gul' // *Termicheskoye uprochneniye prokata*. – M.: Metallurgiya [Thermal hardening of rolled metal. - M.: Metallurgy], 1970. – № 37. – C. 131–137. (in Russian).
4. *GOST 7268-82 Stal'. Metod opredeleniya sklonnosti k mekhanicheskomu stareniyu po ispytaniyu na udarnyy izgib. Mezghosudarstvennyy standart. Tekhnicheskiye usloviya.* [GOST 7268-82 Steel. Method for determining the propensity to mechanical aging by testing for impact bending. Interstate standard. Technical conditions.] (in Russian).
5. Method for testing metals / F. Garofalo, N. J., Metuchen and G. V. Smith; Ithaca, N. Y., assignors to United States Steel Corporation, a corporation of New Jersey Filed. 1955, Dec. 14. Ser. No. 553,104 3. Claims (Cl. 73–15.4) // United States Patent Office. – 1961, June 6.
6. *Sposob otsenki sklonnosti k deformatsionnomu stareniyu termicheski obrabotannykh stal'nykh dlinnomernykh izdeliy* [Method for assessing the propensity to deformation aging of thermally treated steel long products] pat. № 1077936 (RU): C21D9/52 / I. D. Kostogryzov, A. G. Komarov; *zayavl. 25.06.1982; opubl. 07.03.1984. Byul. № 9/1984* [claimed. 06/25/1982; publ. 03/07/1984. Bul. No. 9/1984] (in Russian).
7. Starodubov K.F. *Vliyaniye termicheskoy obrabotki na stabil'nost' svoystv nizkouglerodistoy stali* [Effect of heat treatment on the stability of low-carbon steel properties] / K. F. Starodubov, YU. P. Gul' // *Termicheskoye uprochneniye prokata*. – M.: Metallurgiya [Thermal hardening of rolled metal. - M.: Metallurgy], 1969. – № 30. – p. 32–51. (in Russian).
8. Gul' Yu. P. *Vliyaniye skorosti okhlazhdeniya iz austenitnoy oblasti na sklonnost' uglerodistykh staley k deformatsionnomu stareniyu* [Effect of the cooling rate from the austenite region on the propensity of carbon steels to deformation aging] / YU. P. Gul', YU. A. Klyushnik, V. S. Andriyevskiy, V. A. Khavaldzhi, L. A. Pereverzeva, I. Z. Shukis // *Termicheskaya obrabotka metallov*. – M.: Metallurgiya [Heat treatment of metals. - M.: Metallurgy], 1980. – № 9. – p. 104–106. (in Russian).
9. Gul' Yu. P. *Povysheniye khladostoykosti tolstolistovoy nizkouglerodistoy stali putem termicheskogo uprochneniya* [Increase of cold resistance of thick-gauge low-carbon steel by thermal hardening] / YU. P. Gul', YU. A. Klyushnik, YU. A. Bembinek, M. A. Zadorozhnaya, T. S. Rashba // *Stal'* [Steel]. – 1972. – № 5. – p. 441–443. (in Russian).
10. Gul' Yu. P. *Udarnaya vyazkost' deformatsionno-sostarennoy shirokopolosnoy stali v zavisimosti ot razmera ferritnogo zerna* [Impact strength of deformed-aged broadband steel as a function of the size of the ferritic grain] / YU. P. Gul', R. Ya. Rabukhina, I. YU. Belogortseva // *Termicheskaya obrabotka prokata*. – M.: Metallurgiya [Heat treatment of rolled metal. - M.: Metallurgy], 1983. – p. 64–66. (in Russian).
11. Gul' Yu. P. *Deformatsionnyye vozdeystviya v tekhnologiyakh termicheskoy i kombinirovannoy obrabotki metalloproduktov* [Deformation effects in technologies of thermal and combined processing of metal products] / YU. P. Gul' // *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye: sb. nauch. tr. – Dnepropetrovsk: PGASA* [Construction, material science, engineering: Sat. sci. tr. - Dnepropetrovsk: PSACEA], 2011. – Vol. 58. – p. 29–39. (in Russian).
12. Gul' Yu. P. *Vliyaniye deformatsionnogo stareniya na uprochneniye i okhrupchivaniye termomekhanikotermicheski uprochnonnykh nizkouglerodistykh staley* [Effect of deformation aging on hardening and embrittlement of thermomechanically thermally strengthened low-carbon steels] / YU. P. Gul', I. Z. Shukis // *Proizvodstvo termicheskoy obrabotannogo prokata*. – M.: Metallurgiya [Production of heat-treated rolled products. - M.: Metallurgy], 1986. – p. 22–25. (in Russian).
13. Gul' Yu. P. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov pravki goryachekatanykh trub iz nizkouglerodistoy stali* [Optimization of technological parameters of dressing of hot-rolled pipes from low-carbon steel] / YU. P. Gul', L. I. Tyutyunnik, O. S. Vil'yams, A. N. Kondrat'yeva, T. I. Savenkova // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. – 1976. – № 5. – p. 29–31. (in Russian).
14. Gul' Yu. P. *Vliyaniye temperatury pravki na svoystva trub iz sredneuglerodistoy stali* [Effect of dressing temperature on the properties of medium carbon steel pipes] / YU. P. Gul', O. S. Vil'yams, V. S. Andriyushenko, V. S. Andriyevskiy, T. I. Savenkova, R. YA. Rabukhina // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. – 1978. – № 3. – p. 36–37. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. Д.В. Лаухінім (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Г.Д. Сухомлінім (Україна)