

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669.1:66.04

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2170>

Устранение короблений при упрочняющей термической обработке мелких стержневых изделий

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ydolgachev@donstu.ru

EDN: HZFVXR

Аннотация

Введение. Стержневые изделия, например всевозможные иглы, оси, штифты, валы, шпильки, плунжеры и др., широко востребованы в современной промышленности. В технологическом процессе производства мелких длинномерных изделий существует проблема искажения их форм вследствие действия внутренних напряжений, вызванных неравномерным нагревом, охлаждением, деформацией или фазовыми превращениями металла. Известные способы устранения коробления предполагают дополнительную механическую правку (зачастую ручным способом), что увеличивает трудоёмкость производства и себестоимость продукции, при этом снижаются эксплуатационные характеристики изделий. Чтобы избежать этого явления, предлагается использовать особенности технологии термической обработки в магнитном поле (ТОМП), которые обуславливают возможность зарождения мартенсита напряжения в температурном интервале сверхпластичности аустенита и одновременного заневоливания стержневого изделия вдоль магнитного потока. Таким образом, целью настоящей работы является исследование возможности уменьшения коробления продукции стержневой формы с помощью воздействия магнитным полем при термической обработке.

Возможности технологии ТОМП предлагается апробировать на машинных иглах, в качестве критерия коробления которых выступает величина остаточной деформации, а основными показателями свойств являются твёрдость и предел выносливости. Исследование игл проведено в процессе серийной и экспериментальной технологии обработки, в том числе между различными операциями технологического процесса.

Материалы и методы. Изучались машинные иглы из стали У10А диаметром 0,65, 0,75, 1,10 и 1,20 мм. Применялись стандартные режимы обработки и обработка ТОМП на специальной установке. Измерялась величина радиального биения. Исследовалась тонкая структура с помощью ПЭМ и рентгеновской дифрактометрии. Эксплуатационные характеристики оценивались усталостными испытаниями с определением предела выносливости.

Результаты исследования. Получены данные о распределении радиальных биений и углов отклонения острия игл после обычной закалки и низкого отпуска, а также после ТОМП и низкого отпуска. Дана оценка эксплуатационным характеристикам (пределу выносливости) игл с различным короблением после стандартной обработки и после ТОМП. Представлены изменения параметров тонкой структуры мартенсита после закалки в магнитном поле, анализ дисперсности структуры мартенсита (пакетной и двойниковой морфологии) после обычной закалки и ТОМП. Показаны изменения твердости по длине иглы после различных режимов обработки.

Обсуждение. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о возможности устранения коробления мелких стержневых деталей при использовании упрочняющей технологии ТОМП. Закалка в магнитном поле сопровождается своеобразной внутренней правкой и заневоливанием длинной оси изделия в вертикальном положении вдоль линий магнитного потока.

Закключение. Опытным путем получены свидетельства того, что упрочняющая технология ТОМП, основанная на закалке стали в магнитном поле, позволяет дополнительно устранять радиальные биения изделий стержневой формы. В процессе внутренней рихтовки, которая реализуется особой схемой обработки ТОМП, исключается необходимость обычной мехобработки, снижающей эксплуатационные характеристики изделия.

Ключевые слова: мелкие стержневые изделия, иглы, инструментальная сталь, коробление, закалка в магнитном поле, радиальные биения

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания по содержанию статьи, сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ, профессора Ю.М. Домбровского и заведующего кафедрой М.С. Егорова за помощь в получении и обсуждении результатов исследования.

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Устранение короблений при упрочняющей термической обработке мелких стержневых изделий. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2170. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2170>

Original Empirical Research

Elimination of Distortion during Strengthening Heat Treatment of Small Rod Products

Viktor N. Pustovoyt , Yuri V. Dolgachev  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 ydolgachev@donstu.ru

Abstract

Introduction. Rod-shaped products, such as various needles, axles, pins, shafts, studs, plungers, etc., are in high demand in modern industry. In production of small long products, distortion of their shapes due to the action of internal stresses caused by uneven heating, cooling, deformation or phase transformations of the metal, is a pressing issue. Known methods for eliminating warping involve additional mechanical straightening (often manual), which increases labor intensity and product costs while reducing product performance. To avoid this phenomenon, the use of magnetic field heat treatment (MFHT) technology is proposed. This technology facilitates the initiation of stress-induced martensite within the superplastic temperature range of austenite, along with the simultaneous constraint of the rod product along the magnetic flux. Therefore, the objective of the present study is to explore the feasibility of reducing distortion in rod-shaped products by applying a magnetic field during heat treatment. It is proposed to test the capabilities of MFHT technology on machine needles, where the warping criterion is the magnitude of residual deformation, and the key property indicators are hardness and fatigue limit. The study involves testing needles during both serial and experimental processing, including between different process steps.

Materials and Methods. Machine needles made of U10A steel (GOST 1435-99) with diameters of 0.65 mm, 0.75 mm, 1.10 mm and 1.20 mm were studied. Standard processing modes and MFHT processing on a special installation were used. The radial runout value was measured. The fine structure was studied using TEM and X-ray diffractometry. The operational characteristics were assessed by fatigue tests with determination of the fatigue limit.

Results. The data on the distribution of radial runouts and deviation angles of the needle tip after conventional quenching and low tempering, as well as after MFHT and low tempering were obtained. The operational characteristics (fatigue limit) of needles with different warping after standard treatment and after MFHT were estimated. Changes in the parameters of the fine structure of martensite after quenching in a magnetic field were studied. The dispersion of the martensite structure (packet and twinned morphology) after conventional quenching and MFHT was analyzed. Data on the change in hardness along the length of the needle after various treatment modes were presented.

Discussion. Experimental data obtained demonstrate the feasibility of eliminating warping in small rod-shaped components using the MFHT hardening technology. Hardening in a magnetic field involves a kind of internal straightening and constraining of the long axis of the product in a vertical position along the magnetic flux lines.

Conclusion. Experimental evidence demonstrates that the hardening technology involving heat treatment in a magnetic field (MFHT), which relies on steel quenching under a magnetic field, can additionally eliminate radial runout in rod-shaped products. The internal straightening process, which is achieved using a specified MFHT processing scheme, eliminates the need for conventional machining, which reduces performance characteristics.

Keywords: small rod products, needles, tool steel, warping, magnetic field hardening, radial runout

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board of the Journal for their valuable comments on the content of the article, the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals, DSTU, Professor Yu.M. Dombrovsky and Head of the Department M.S. Egorov for their help in obtaining and discussing the research results.

For Citation. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV. Elimination of Distortion during Strengthening Heat Treatment of Small Rod Products. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2170. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2170>

Введение. В современной промышленности широко востребованы различные изделия стержневой формы, имеющие соотношение (длина(L) / диаметр (D)) > 10 . Это всевозможные иглы (швейные, промышленные, медицинские), оси, штифты, валы, шпильки, плунжеры и др. Термическая обработка подобных изделий, применяемая для формирования необходимых свойств готовой продукции, сопряжена с сильным короблением [1, 2]. Данная

проблема решается последующими операциями рихтования и правки [3, 4]. Однако такой подход имеет свои недостатки. Во-первых, подобные процедуры достаточно трудозатратны, т. к. зачастую осуществляются вручную, что увеличивает себестоимость продукции (≥ 50 % от изначальной стоимости [5, 6]). А во-вторых, они могут оказывать негативное влияние на эксплуатационные свойства изделия, сокращая срок его службы [7, 8].

Для решения обозначенной проблемы предлагается использовать особенности технологии термической обработки в магнитном поле [9]. Под действием магнитного поля возможно зарождение мартенсита напряжения [10], что обуславливает возможность внутренней правки изделия за счёт воздействия в состоянии сверхпластичности [11, 12] и одновременного заневоливания обрабатываемого стержня вдоль вектора магнитного поля. Действие ТОМП (эффективность упрочнения $8 \div 12$ %) можно сравнить по характеру влияния с эффектом от высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) ($19 \div 24$ %) [13, 14] в том смысле, что обеспечивается одновременное повышение показателей сопротивляемости пластической деформации и хрупкому разрушению. Известно, что при использовании ТОМП оптимальное сочетание свойств формируется при проведении закалки в магнитном поле с отпуском без поля [9].

Возможности технологии ТОМП предлагается апробировать на машинных иглах, в качестве критерия коробления которых выступает величина остаточной деформации (радиальные биения), а основными показателями свойств являются твёрдость и предел выносливости. Предполагается исследование игл в процессе серийной и экспериментальной технологии обработки, в том числе и между различными операциями технологического процесса.

Целью данной работы является исследование возможности уменьшения коробления изделий стержневой формы путем воздействия на него магнитным полем при термической обработке.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была использована продукция Артинского механического завода: по 100 шт. машинных игл (ГОСТ 22249-82) разного диаметра (0,65, 0,75, 1,10 и 1,20 мм) для каждого режима. Машинные иглы изготовлены из стальной игольной проволоки марки У10А (ГОСТ 1435-99). Химический состав этой проволоки приведён в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав проволоки для изготовления игл

Номер партии	Диаметр, мм	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %
367	1,90	0,98	0,20	0,18	0,014	0,020
598	1,64	1,01	0,26	0,29	0,015	0,023
1239	2,04	1,01	0,27	0,28	0,013	0,016
471	2,04	1,03	0,27	0,29	0,016	0,021

Данные изделия в процессе производства претерпевают довольно много технологических переделов, что обусловлено особенностями их конструкции. Можно выделить следующие основные операции: механическая обработка, термическая обработка, финишные операции (хромирование). После всех операций формообразования иглы подвергаются термической обработке, имея исходную структуру зернистого перлита. Стандартный режим термической обработки предусматривает неполную закалку и низкий отпуск. Закалка проводилась в подогретом масле (~ 60 °C). После закалки твердость должна составлять $59 \div 63$ HRC. Отпуск выполнялся в масляных электрованнах при температуре $200 \div 225$ °C в течение 30 минут. Твердость стержня после отпуска составляла $53 \div 59$ HRC, а твердость колбы — не ниже 23 HRC.

ТОМП проводилась на лабораторной установке, описанной в [15]. Главная особенность установки заключается в том, что игла нагревается и удерживается в верхней части печи в вертикальном положении с помощью действия магнитного поля, создаваемого соленоидом. Когда температура иглы достигает ~ 745 °C, она теряет магнитные свойства и вертикально падает, одновременно нагреваясь в печи 780 °C, в закалочный бак. Здесь действует магнитное поле, которое способствует интенсивному образованию мартенсита и вертикальному заневоливанию изделия. Далее следует отпуск без магнитного поля. Как было показано в [9], наложение магнитного поля при отпуске заэвтектоидных сталей нецелесообразно, т. к. тормозит распад твёрдого раствора.

Для исследования особенностей тонкой структуры применялся электронный микроскоп «УЭМВ-100К» путём прямого просвечивания фольги и рентгеновский дифрактометр «ДРОН-0,5» с трубкой FeKa.

Степень коробления оценивалась величиной радиального биения, измерявшегося на микроскопах «ЕС МЕТАМ РВ-22» и «Микромед МС-2-Zoom вар.2CR» с цифровой окулярной насадкой Eakins и объект-микроскопом.

Измерения твердости проводились по методам Роквелла и Виккерса на приборах «ТК-2М» и «ИТБРВ-187,5-М» соответственно.

Усталостные испытания при поперечном изгибе были проведены с пульсирующей нагрузкой, создаваемой асинхронным электродвигателем. Предел выносливости определялся по методике В.С. Ивановой [16].

Для обработки массива полученных данных использовался пакет статистических функций MS Excel; гистограммы, диаграммы и графики также созданы в этой среде.

Результаты исследования. Стандартная обработка формирует структуру игл, которая определяет следующие свойства: предел выносливости $\sigma_{-1} = 480$ МПа, остаточная деформация $\Delta l_{\text{ост.}} \approx 0,15$ мм (для иглы $\varnothing 1,20$ мм). Чем меньше диаметр игл, тем меньше величина остаточной деформации после термической обработки, например, для $\varnothing 0,75$ мм она снижается до $\Delta l_{\text{ост.}} = 0,07 \div 0,08$ мм.

Важным эксплуатационным параметром иглы служит значение радиального биения (l) оси стрежня относительно оси колбы. Радиальные биения [17, 18] возникают из-за внутренних напряжений, обусловленных неравномерностями пластической деформации во время механообработки и распределения температуры при операциях термообработки. Радиальные биения устраняются на различных стадиях техпроцесса (редуцирование, фрезерование, пробивка отверстий, заточка, шлифовка, термообработка, гальванизация, полировка и т. д.) комплексом правильных операций. Поэтому для получения качественной продукции и уменьшения трудозатрат на её изготовление необходимо в техпроцессе исключить факторы, вызывающие радиальные биения.

Результаты распределения значений радиального биения игл (l) и углов (φ) отклонения их острия от вертикальной оси после обработки по стандартному режиму приведены на рис. 1 и 2.

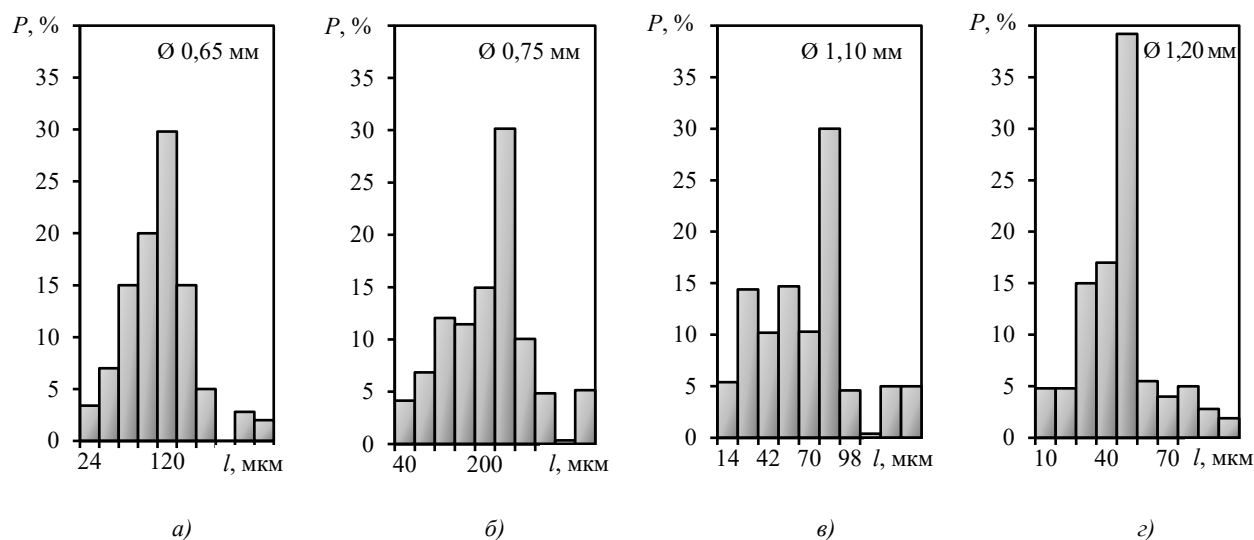
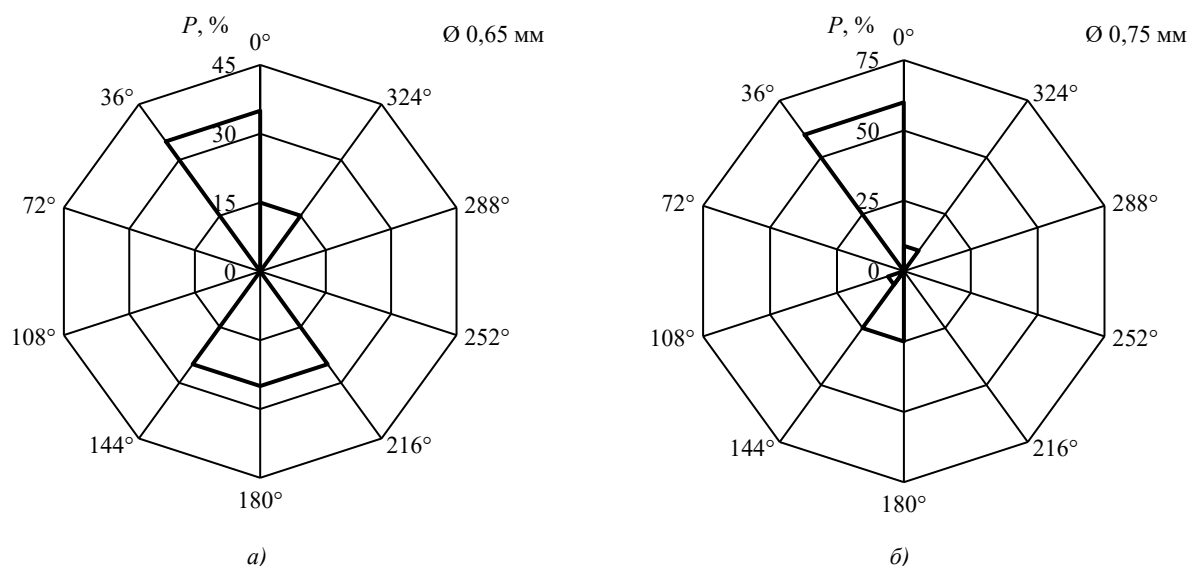


Рис. 1. Распределение радиальных биений (l) игл разного диаметра после закалки:
а — $\varnothing 0,65 \text{ мм}$; б — $\varnothing 0,75 \text{ мм}$; в — $\varnothing 1,10 \text{ мм}$; г — $\varnothing 1,20 \text{ мм}$



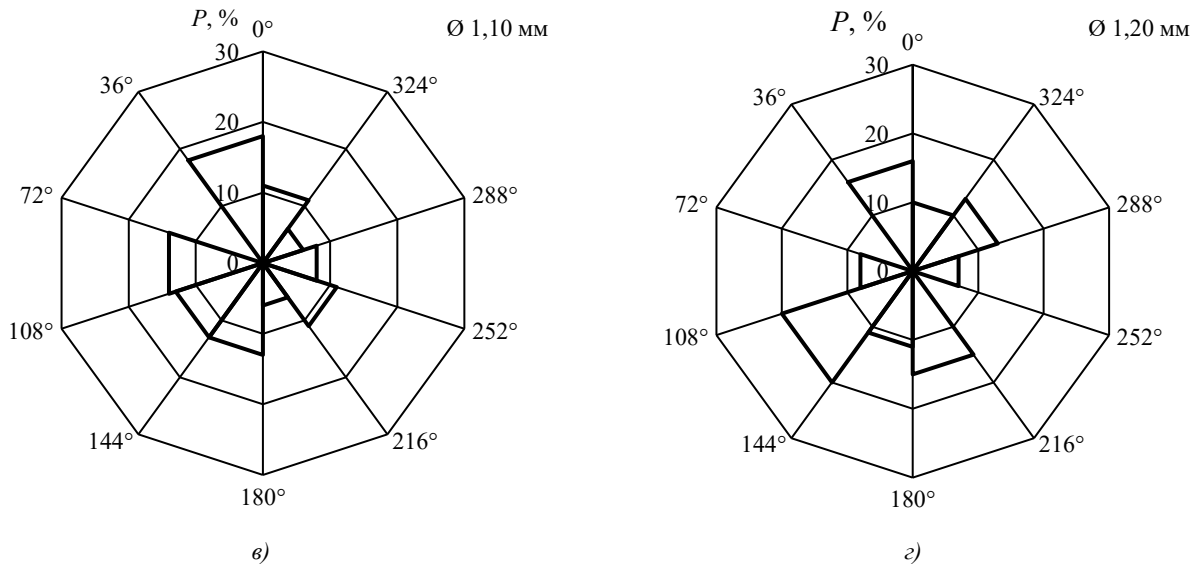


Рис. 2. Распределение углов (φ) отклонения острия игл разного диаметра от вертикальной оси (начало отсчёта от фрезерованного желобка) после закалки: а — $\varnothing 0,65$ мм; б — $\varnothing 0,75$ мм; в — $\varnothing 1,10$ мм; г — $\varnothing 1,20$ мм

После закалки изделий $\varnothing 0,65$ мм интервал разброса значений l был аналогичен полученным результатам после механической обработки и составлял $\sim 0,3$ мм, в то время как технические условия требуют для готовой продукции $l_0 \leq 0,1$ мм. Половина из 100 обработанных игл имела превышение по данному параметру. Можно отметить тенденцию отклонения (φ) стержня либо в сторону фрезерованного желобка (45 %), либо в противоположную (40 %). Такое поведение объясняется тем, что внутренние напряжения имеют преимущественную ориентировку, созданную операциями мехобработки (как предварительными, так и финишными). Закалочный нагрев не снимает все подобные напряжения, и они, аккумулируясь с термическими, в итоге создают наблюдаемое коробление.

Для диаметра $\varnothing 0,75$ мм наблюдается аналогичная картина: 60 % стержней отклоняются в область углов $\varphi = 0^\circ$, а 25 % — $\varphi = 180^\circ$; превышение коробления, допустимого для данного диаметра ($l_0 \leq 0,15$ мм), наблюдалось у 65 % образцов, максимальное значение $l = 0,4$ мм. Закалка изделий более крупного диаметра ($\varnothing 1,10$ мм, $\varnothing 1,20$ мм) приводила к получению максимального коробления ($l = 0,14$ и $0,10$ мм соответственно), удовлетворяющего требованиям технических условий ($l_0 \leq 0,15$ мм), а распределение углов отклонения острия (φ) было равновероятным.

Проведение отпуска способствует сужению интервала максимальных значений коробления l (рис. 3) на следующие величины: $\varnothing 0,75$ мм — $0,04$ мм; $\varnothing 1,10$ мм — $0,02$ мм. Для изделий меньших диаметров наблюдается двукратное увеличение доли продукции, проходящей по техническим условиям. Для $\varnothing 1,10$ мм (рис. 4) характерно равновероятное распределение φ , в то время как для $\varnothing 0,75$ мм оно имеет преимущественное направление: 30 % — $\varphi = 0^\circ$, 50 % — $\varphi \approx 180^\circ$.

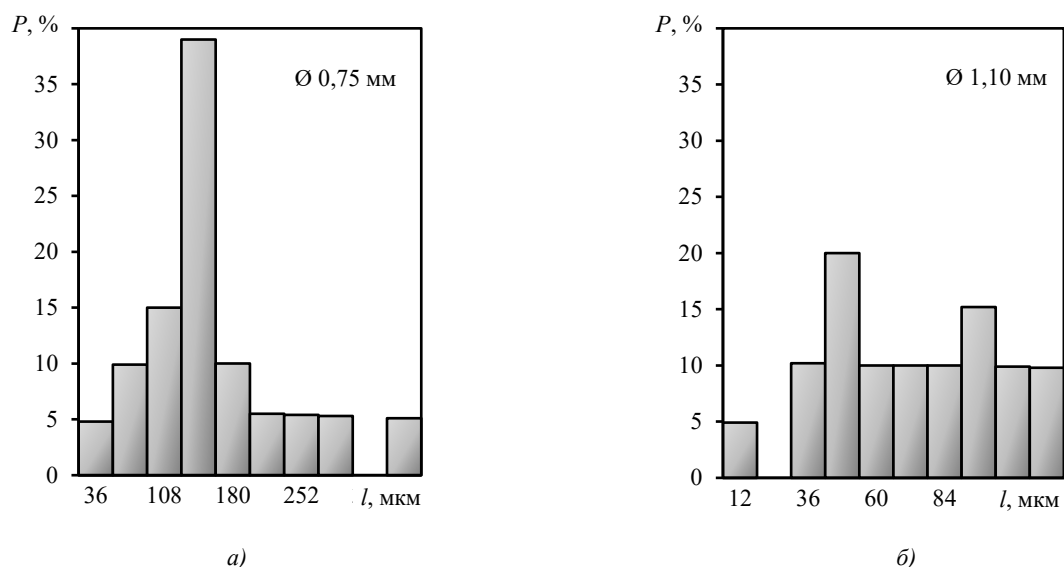


Рис. 3. Распределение величины коробления (l) после проведения низкого отпуска: а — $\varnothing 0,75$ мм; б — $\varnothing 1,10$ мм

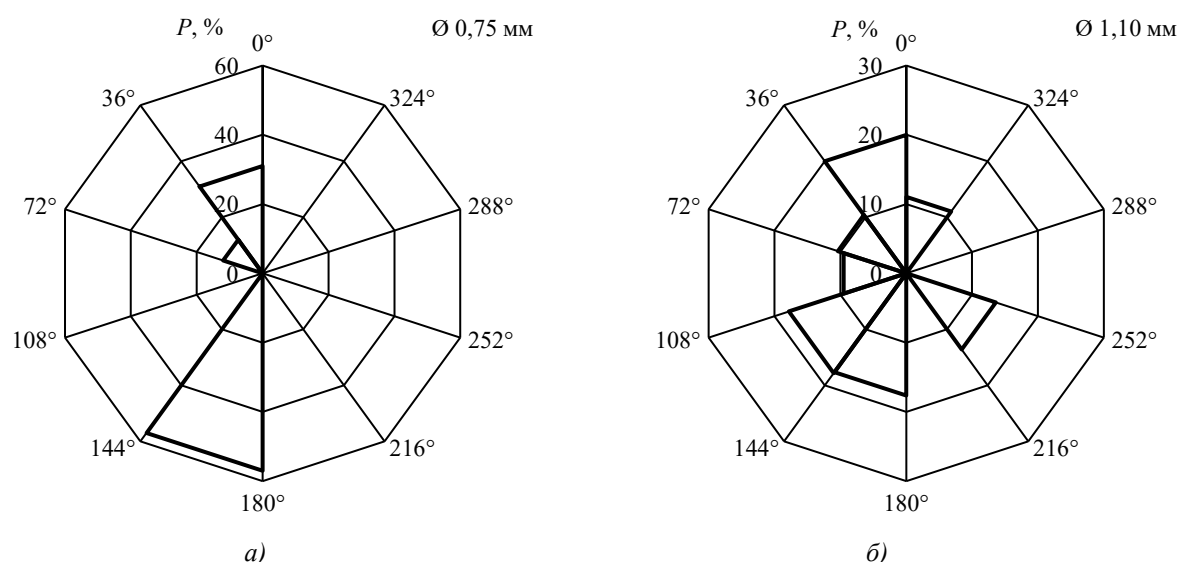


Рис. 4. Распределение углов (φ) отклонения острия игл разного диаметра от вертикальной оси (начало отсчёта от фрезерованного желобка) после отпуска: а — $\varnothing 0,75$ мм; б — $\varnothing 1,10$ мм

Выполненные исследования изделий с различным короблением позволили установить, что наилучшие эксплуатационные значения (σ_{-1} , $l_{\text{ост.}}$) имеет продукция, которая в процессе изготовления не имела либо имела минимальное коробление после термообработки и по этой причине не подвергалась правильным операциям (таблица 2).

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики изделий $\varnothing 0,65$ мм с различным короблением

l , мкм	$l_{\text{ост.}}$, мм	σ_{-1} , МПа
0–20	0,02–0,08	460–480
0–20 (после правки)	0,16–0,24	420–440
80–100	0,32–0,36	400–420
180–200	0,34–0,40	370–410

При исследованиях морфологии [9, 10] не было выявлено качественной разницы между мартенситом напряжения и охлаждения, полученным в процессе закалки в магнитном поле и после обычной закалки. Как показали рентгеноструктурные исследования, влияние магнитного поля сводится в основном к увеличению объёмной доли V_{κ} κ -мартенсита (на 10 % при закалке с 1000 °С) и уменьшению тетрагональности α -мартенсита (рис. 5).

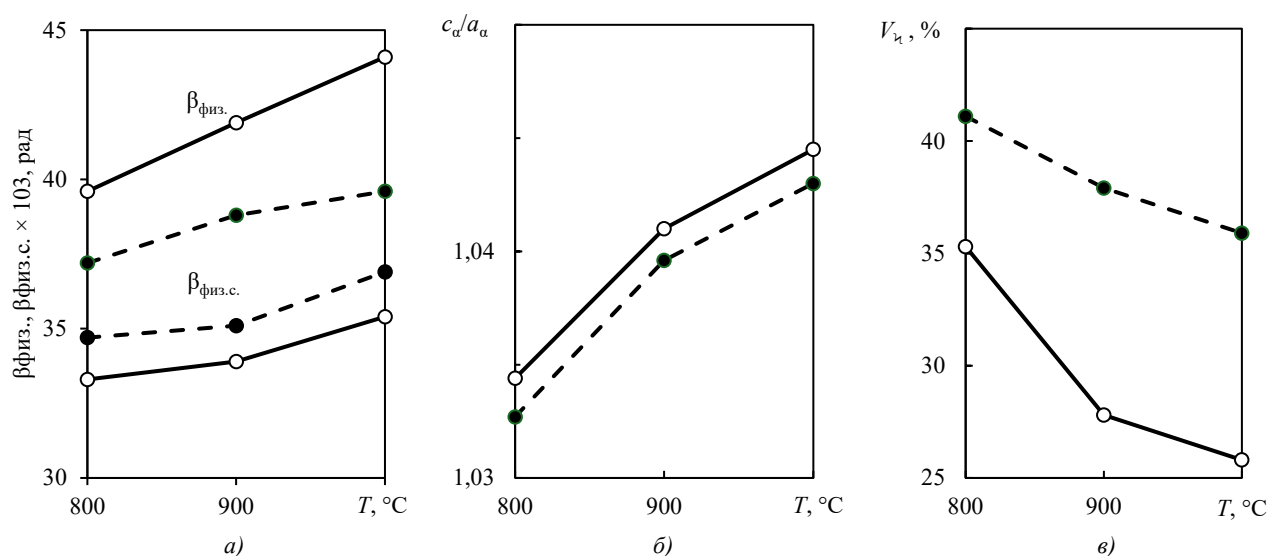


Рис. 5. Результаты рентгеноструктурных исследований параметров мартенсита стали У10 (сплошная линия — обычная закалка, штриховая линия — закалка в поле $H = 1,2$ МА/м): а — изменение физического профиля дифракционных линий; б — параметр тетрагональности α -мартенсита; в — объёмная доля κ -мартенсита

При закалке в магнитном поле, по сравнению с обычной закалкой, стабильно наблюдалось уширение мартенситного синглета $\beta_{\text{физ.с.}}$ из-за большего количества нарушений кристаллического строения. Под действием поля усиливается степень двухфазного распада, на что чётко указывает сокращающийся физический профиль мультиплета мартенситной рентгеновской дифракционной линии $\beta_{\text{физ.}}$.

Исследования на просвет металлической фольги показали, что образующийся мартенсит имеет смешанную морфологию (реечные+двойникованные кристаллы) при всех режимах обработки. Было установлено, что высокая плотность дефектов при закалке в поле объясняется повышенной дисперсностью продуктов мартенситной реакции. Результаты статистической оценки элементов тонкой структуры показаны на рис. 6. Влияние магнитного поля проявляется в том, что в пакетном мартенсите наблюдается измельчение (уменьшается количество крупных пакетов), размеры пакетов становятся более однородными, имеется тенденция к уменьшению толщины реек внутри пакетов, а также увеличивается доля самого пакетного мартенсита (на $12 \pm 4\%$). Изменения в морфологии обусловлены тем, что граница между разными типами мартенсита сдвигается в область с большей концентрацией углерода. Такие изменения объясняются взрывной кинетикой множественного появления мартенситных зародышей: охлаждения — в области старта мартенситного превращения, напряжения — в области сверхпластичности мартенситного превращения (несколько выше M_n). Дополнительно можно отметить, что под воздействием поля усиливается роль деформационного скольжения при зародышеобразовании α -фазы.

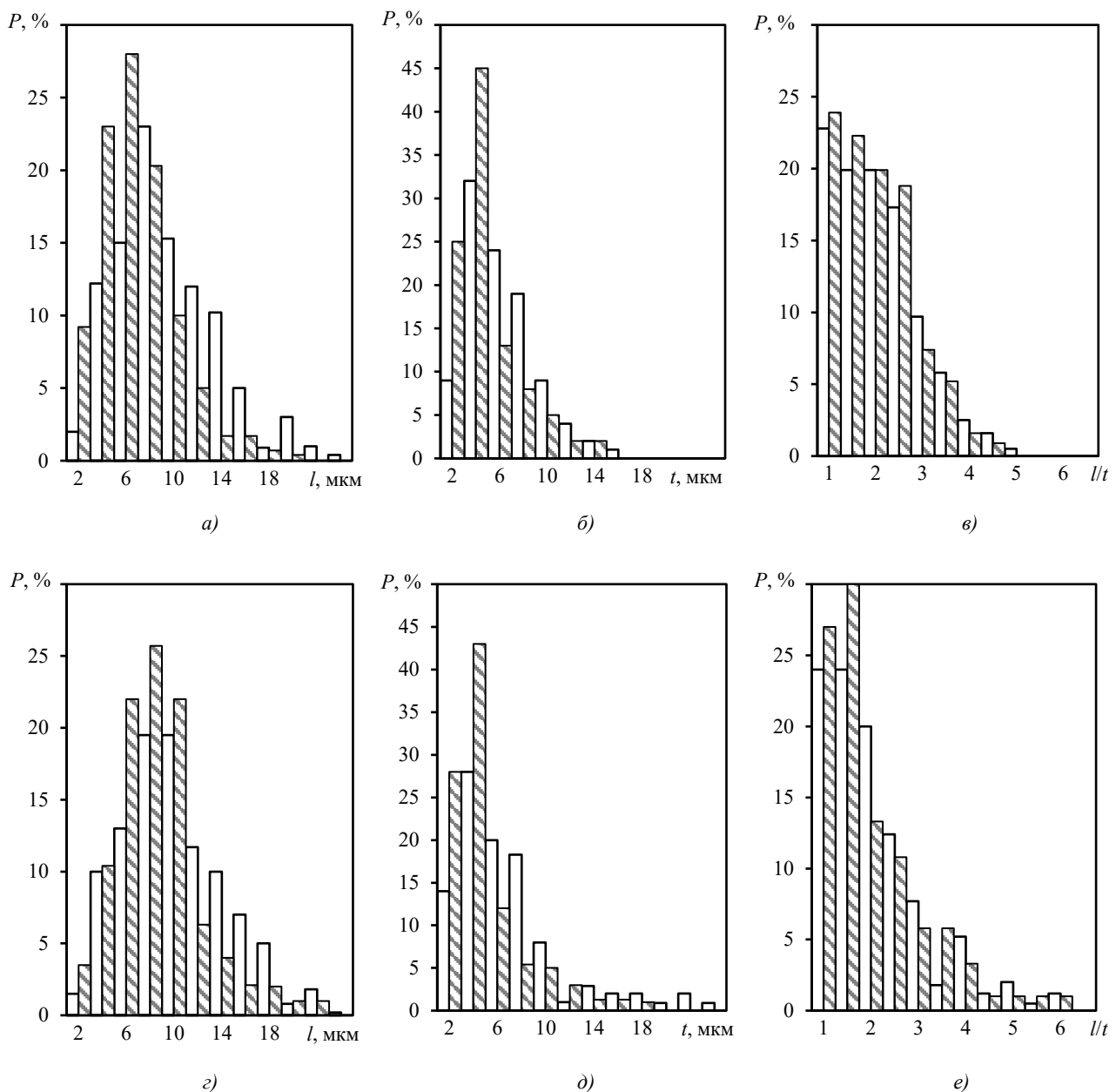


Рис. 6. Распределение длины (l), ширины (t) и формфактора (l/t) мартенсита стали У10А после обычной закалки (белые столбцы) и закалки в магнитном поле 1,6 МА/м (столбцы со штриховкой) для: а, б, в — мартенситных пакетов; г, д, е — двойникованных кристаллов мартенсита

Данные на рис. 6 свидетельствуют об измельчении областей с двойникованными кристаллами мартенсита при обработке в магнитном поле, но формфактор их остается без изменений. Повышение дисперсности также связано с каталитическим действием магнитного поля на множественное и повсеместное появление зародышей мартенсита, интенсифицируется появление мартенсита пакетной морфологии (образующегося при более высокой температуре [19, 20]), что вызывает явление наклепа γ -фазы.

Значения твердости после обработки в магнитном поле были всегда выше, чем при обработке без поля (рис. 7). Такие результаты объясняются уменьшением размерных параметров мартенситных кристаллов, снижением объёмных долей $A_{\text{ост.}}$ и других фаз (кроме мартенситной), протеканием дисперсионного твердения (в процессе закалки непосредственно происходит выделение промежуточного карбида [21, 22]). Исключение составляет твердость в районе колбы, которая падает при магнитной закалке, что объясняется интенсификацией протекания процесса самоотпуска [23, 24] в более крупной части изделия.

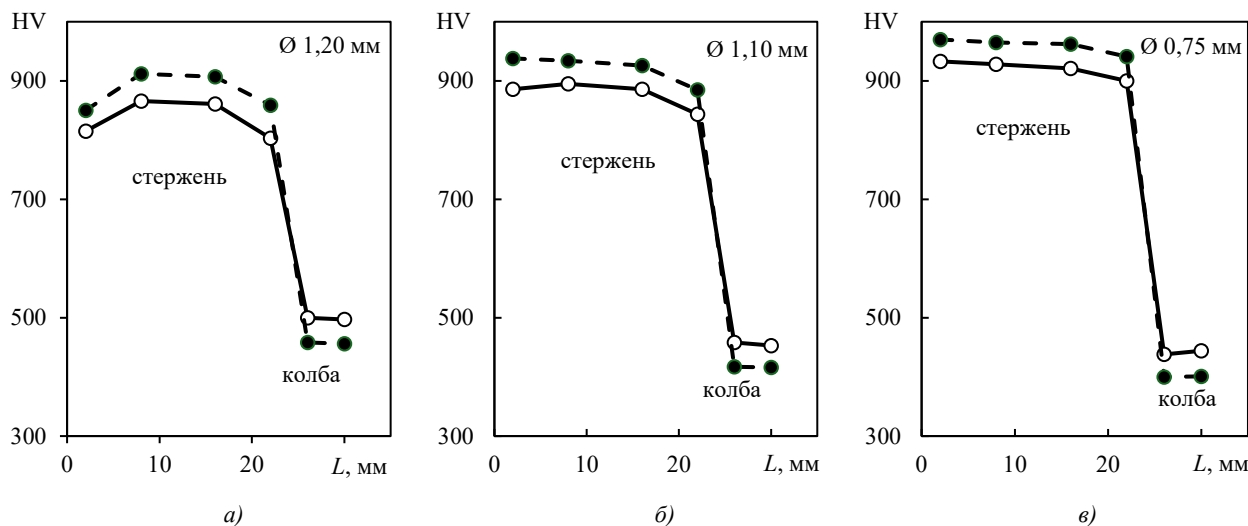


Рис. 7. Результаты измерения твёрдости игл по методу Виккерса (обычная закалка — сплошная линия; закалка в магнитном поле $H = 0,8$ МА/м — штриховая линия): а — Ø 1,20 мм; б — Ø 1,10 мм; в — Ø 0,75 мм

Исследование величины l изделий после термообработки в магнитном поле показало отсутствие коробления, превышающего технические требования ($l < l_0$), а распределение углов φ было равновероятным для всех диаметров. Пример полученных данных для диаметра Ø 0,65 мм, имевшего наибольшее коробление при обработке по стандартному режиму, показан на рис. 8. Все иглы имели коробление $l < l_0/2$ ($l_0 = 0,1$ мм), а две трети игл удовлетворяли и условию $l < l_0/4$. Значения твёрдости иглы после закалки и отпуска принципиально не изменились, хотя и немного понизились (рис. 8 б).

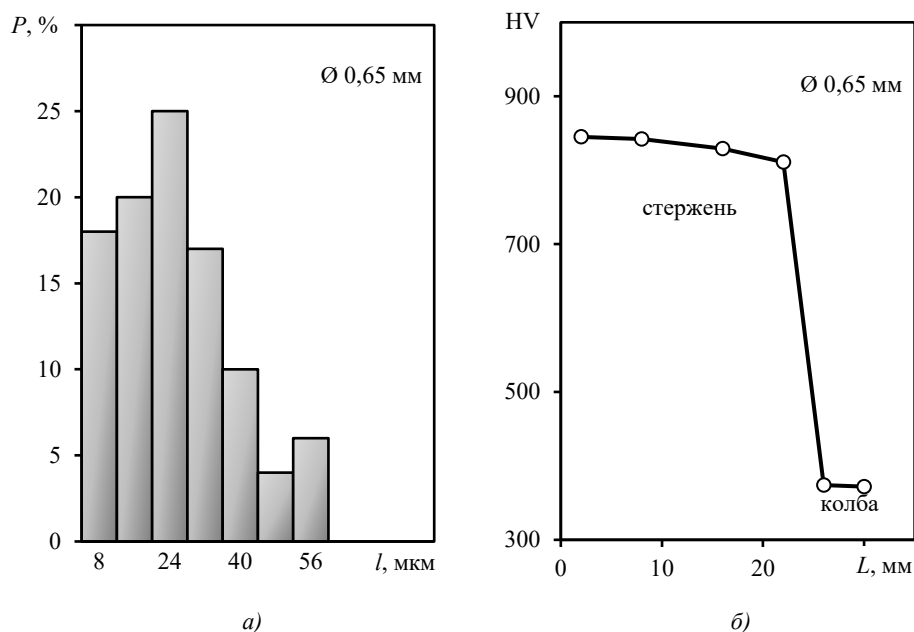


Рис. 8. Распределение значений для изделия после ТОМП и отпуска: а — величина коробления; б — твёрдость

В режиме обработки ТОМП промежуточные правильные операции не проводились. Следовательно, значительное уменьшение радиального биения происходит только от внутреннего воздействия в процессе ТОМП, где определяющую роль играют сверхпластичность [25], наблюдающаяся в стали немного выше точки начала мартенситного превращения, а также непосредственное заневоливание иглы вдоль вертикальной оси под действием магнитного потока, что определяется уже особенностями предлагаемой установки [15] для поштучной ТОМП деталей с соотношением $L/D > 10$.

Поскольку при ТОМП исключаются операции промежуточной рихтовки, то это сказывается на значении предела выносливости изделий. Исследованные значения σ_{-1} (рис. 9) для игл с радиальным биением $l \approx 25$ мкм были выше для всех диаметров, по сравнению со значениями, полученными после типовой обработки.

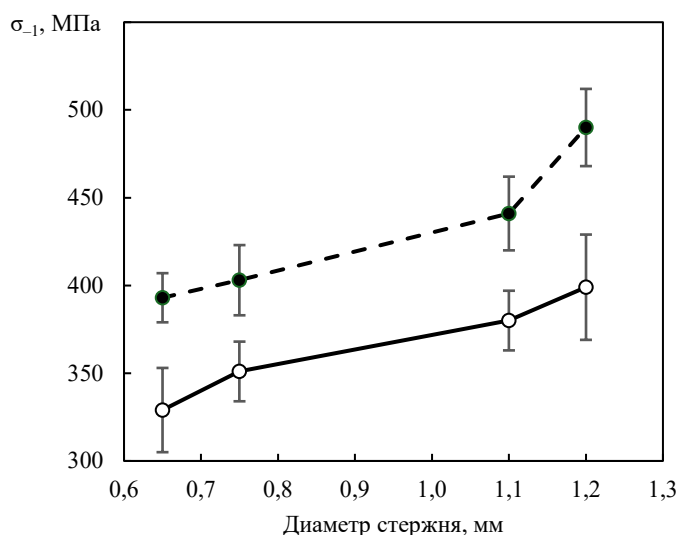


Рис. 9. Предел выносливости изделий с $l \approx 25$ мкм: стандартная обработка с операциями рихтования (сплошная линия); ТОМП (штриховая линия)

Обсуждение. Полученные данные (рис. 1, 2) указывают на несомненную связь искривления стержня с его жёсткостью. Иглы больших диаметров имеют и большую жёсткость стержня по отношению к колбе, что коррелирует с меньшей подверженностью короблению (главным образом связанным с фрезерованием желобка). Иглы крупных диаметров после мехобработки имели значения $l \leq l_0$, т.е. не превышали допустимых отклонений, а угловое распределение отклонений φ было равномерным по всем углам.

У изделий меньшего номера после закалки наблюдалось предпочтительное отклонение вдоль фрезерованного желобка (как в одну, так и в другую сторону). Подобное коробление вызвано наличием ориентации во внутреннем напряжённом состоянии детали, возникшем после механообработки и следом проводимой рихтовки, последствия которых не устраняются нагревом, а сочетаясь с закалочными деформациями, они и приводят к наблюдаемым отклонениям острия под определённым углом.

Процессы, протекающие при отпуске (рис. 3, 4), несколько снижают значения l для всех диаметров, оставляя их у малых диаметров вне допустимых пределов, а имеющееся преимущественное распределение по φ сохраняется.

Данные таблицы 2 демонстрируют, что в процессе механообработки происходит такое изменение напряжённого состояния детали, когда значительно падают эксплуатационные показатели изделия. Таким образом, если устранить коробление (и, следовательно, необходимость в правке), то можно повысить эксплуатационные свойства изделий [26]. Реализация бездеформационной закалки становится возможной благодаря своеобразной внутренней рихтовке (рис. 5 и 6) за счёт возникновения кристаллов мартенсита напряжения (под действием магнитного поля в интервале сверхпластичности) и ориентированному заневоливанию игл вдоль линий магнитного потока.

Статистические данные на рис. 6 свидетельствуют об измельчении мартенситной фазы (речной и двойниковой морфологии), ансамбля в целом (пакета) и кристалла в отдельности в случае закалки в магнитном поле. Дисперсность, соответственно, увеличивает удельную поверхность границы и субграницы — создаются дислокационные барьеры для пластической деформации. Пиковые напряжения спадают и более равномерно распределяются в ситуации, когда области скопления дислокаций фрагментируются и пакеты мартенсита более однородно распределяются. Таким образом, закалка в магнитном поле формирует структуру мартенсита с большим запасом реализуемых прочностных и пластических показателей, что обеспечивает повышенный комплекс свойств после ТОМП.

По результатам исследования влияния низкого отпуска (рис. 3, 4, 8) можно заключить, что он, снижая уровень закалочных напряжений, не приводит к кардинальному искоренению радиальных биений.

Результаты исследования предела выносливости (рис. 9) показали его повышение при обработке в магнитном поле, в сравнении с серийным режимом, предполагающим механическую обработку для устранения коробления.

Заключение. Установлено, что операции механической правки, применяемые для устранения коробления, создают картину напряжений, значительно снижающую эксплуатационные характеристики изделий (предел выносливости может падать до 370 МПа, остаточная деформация может достигать 0,40 мм).

Опытным путем получены свидетельства того, что упрочняющая технология ТОМП, основанная на закалке стали в магнитном поле, позволяет устранять радиальные биения изделий стержневой формы ($L/D > 10$). В процессе внутренней рихтовки, которая реализуется особой схемой обработки ТОМП, исключается необходимость обычной мехобработки, снижающей эксплуатационные характеристики изделия. Это достигается, с одной стороны, непосредственным вертикальным заневоливанием обрабатываемой иглы под действием вектора магнитного потока, а с другой стороны, за счёт влияния магнитного поля на закалочные процессы (повышение дисперсности мартенсита). По сравнению с серийным режимом, наблюдалось увеличение предела выносливости в среднем на ~ 82 МПа, а значения коробления (с двукратным запасом) не превышали технических требований (0,10 мм).

Список литературы / References

1. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.Н. Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>
2. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>
3. Samuel A, Prabhu KN. Residual Stress and Distortion during Quench Hardening of Steels: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31:5161–5188. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06667-x>
4. Schlegel J. Finishing. In book: *The World of Steel*. Wiesbaden: Springer; 2023. P. 357–368. https://doi.org/10.1007/978-3-658-39733-3_9
5. Rajan TV, Sharma CP, Sharma A. *Heat Treatment: Principles and Techniques*, 3rd ed. Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd; 2023. 376 p. <https://books.google.ru/books?id=zuraEAAAQBAJ&hl=ru&lr> (дата обращения: 01.04.2026).
6. Coca-Gonzalez M, Jimenez-Martinez M. Warpage: Causes, Manufacturing Processes and Future Challenges: A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2025;239(6):1201–1217. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14644207241285399> (дата обращения: 01.04.2026)
7. Iskakova D, Kasenov A, Magellan D, Zoltan K. Analysis of Methods of Hardening and Restoration of Worn Parts. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Engineering*. 2024;69(1):137–148. <https://doi.org/10.24193/subbeng.2024.1.14>
8. Бабич В.Е., Багрец Д.А., Белоцерковский М.А., Вегера И.И., Гольцева М.В., Громыко Г.Ф. и др. *Актуальные проблемы прочности*. Монография. В 2-х томах. Том 2. Витебск: Витебский государственный технологический университет; 2018. 512 с.
9. Babich VE, Bagrets DA, Belotserkovsky MA, Vegera II, Goltseva MV, Gromyko GF, et al. *Topical Problems of Strength*. Monograph. In 2 vol. Vol 2. Vitebsk: Vitebsk State Technological University; 2018. 512 p. (In Russ.)
10. Андреев И.Г., Шакиров А.Р. Дефекты, возникающие при термической обработке стали. *Современные материалы, техника и технологии*. 2023;47(2):22–24.
11. Andreev IG, Shakirov AR. Obtaining a Finegrained Structure by Applying Annealing and Normalization. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2023;47(2):22–24. (In Russ.)
12. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. *Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях*. Монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021. 198 с.
13. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. *Magnetic Heterogeneity of Austenite and Transformations in Steels*. Monograph. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2021. 198 p. (In Russ.)
14. Dolgachev YuV, Pustovoit VN, Vernigorov YuM. Stress Martensite Nucleation in a State of Premartensitic Lattice Instability. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):58–65. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65>
15. Huda Z. Plasticity and Superplasticity – Theory and Applications. In book: *Mechanical Behavior of Materials. Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2022. P. 165–188. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84927-6_9
16. Гвоздев А.Е. *Деформирование, структурообразование и разрушение быстрорежущих сталей в условиях сверхпластичности*. Монография. Тула: Тульский государственный университет; 2021. 487 с.
17. Gvozdev AE. *Deformation, Structuring and Destruction of High-Speed Steels under Superplasticity Conditions*. Monograph. Tula: Tula State University; 2021. 487 p. (In Russ.)
18. Бернштейн М.Л. *Термомеханическая обработка металлов и сплавов*. В 2 т. Москва: Metallurgiya; 1968. 574 с.
19. Bernstein ML. *Thermomechanical Treatment of Metals and Alloys*. In 2 vol. Moscow: Metallurgiya; 1968. 574 p. (In Russ.)
20. Guo Yuan, Zhenlei Li, Jian Kang. *New Generation TMCP Technology for Hot Strip*. Singapore: Springer; 2024. 482 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-5257-7>

15. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV. Distortion-Free Heat Treatment of Thin Rods in Magnetic Field. *Materials Performance and Characterization*. 2018;7(6):20170159. <https://doi.org/10.1520/MPC20170159>
16. Иванова В.С. *Разрушение металлов*. Москва: Металлургия; 1979. 168 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007811077>
- Ivanova VS. *Destruction of Metals*. Moscow: Metallurgiya; 1979. 168 p. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007811077> (In Russ.).
17. Roberts WL. *Cold Rolling of Steel*. New York: Routledge; 2017. 808 p. <https://doi.org/10.1201/9781315139661>
18. Харитонов В.А., Таранин И.В. *Холодная прокатка проволоки: история и направления развития*. Монография. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; 2018. 124 с.
- Kharitonov BA, Taranin IV. *Cold Wire Rolling: History and Development Trends*. Monograph. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2018. 124 p. (In Russ.).
19. Morsdorf L, Jeannin O, Barbier D, Mitsuha M, Raabe D, Tasan CC. Multiple Mechanisms of Lath Martensite Plasticity. *Acta Materialia*. 2016;121:202–214. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.09.006>
20. Galindo-Nava EI, Rivera-Díaz-del-Castillo PEJ. A Model for the Microstructure Behaviour and Strength Evolution in Lath Martensite. *Acta Materialia*. 2015;98:81–93. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.018>
21. Bhadeshia HKDH. *Theory of Transformations in Steels*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2021. 604 p. <https://doi.org/10.1201/9781003056782>
22. Михайлов М.С., Рябов В.В. Исследование процесса карбидообразования в среднеуглеродистых высокопрочных сталях. *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016;1(19):1.
- Mikhailov MS, Riabov VV. The Study of Carbide Formation in Middle-Carbon High-Strength Steels. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*. 2016;19(1):1.
23. Sackl S, Clemens H, Primig S. Investigation of the Self Tempering Effect of Martensite by Means of Atom Probe Tomography. *Practical Metallography*. 2022;52(7):374–383. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/147.110343/html> (дата обращения: 01.04.2026).
24. Silveira ACF, Fechte-Heinen R, Epp J. Microstructure Evolution during Laser-Directed Energy Deposition of Tool Steel by in situ Synchrotron X-ray Diffraction. *Additive Manufacturing*. 2023;63:103408. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103408>
25. Padmanabhan KA, Balasivanandha Prabu S, Mulyukov RR, Nazarov A, Imaev RM, Ghosh Chowdhury S. *Superplasticity. Common Basis for a Near-Ubiquitous Phenomenon*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018. 526 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-31957-0>
26. Rybak AT, Teplyakova S., Olshevskaya AV, Prutskov AS. A Method for Monitoring the Reliability of Technical Systems by Identifying the Entropy of the Causes of their Failures. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(2):112–119. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-112-119>

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), ydolgachev@donstu.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: научное руководство, разработка концепции, методологии, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, написание черновика рукописи.

Ю.В. Долгачев: проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание рукописи — устранение замечаний, внесение исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoyt, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), ydolgachev@donstu.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoi: supervision, conceptualization, methodology, project administration, resources, writing – original draft preparation.

YuV Dolgachev: investigation, formal analysis, validation, visualization, writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 02.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.03.2026

Принята к публикации / Accepted 08.04.2026