

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов

(технология • оборудование • инструменты)

 Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov


Влияние деформационной термоциклической обработки и нормализации на механические свойства листовой стали 10

Александр Прудников^{1, a, *}, Светлана Галачиева^{2, b}, Бахыт Абсадыков^{3, c}, Гюзель Шарипзянова^{4, d}, Елена Цыганко^{5, e}, Владимир Иванцовский^{6, f}

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654007, Россия

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), ул. Николаева, 44, г. Владикавказ, 362021, Россия

³ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан

⁴ Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, г. Москва, 107023, Россия

⁵ Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, пр. Ленина, 93, г. Новороссийск, 353924, Российская Федерация

⁶ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-4150-7428>, a.prudnikov@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-7193-0454>, info@skgmi-gtu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0001-7829-0958>, absadykov@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-0863-7490>, guzel@mtw.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-5920-8688>, lana_tsyganko@mail.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>, ivancivskij@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.785.6:669.14.018.24:620.17

История статьи:

Поступила: 06 декабря 2024

Рецензирование: 30 декабря 2024

Принята к печати: 23 января 2025

Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Сталь 10

Деформационная термоциклическая

обработка (ДТЦО)

Нормализация

Механические свойства

Прочность

Пластичность

Горячекатаная сталь

Относительное удлинение

Относительное сужение

Оптимальный режим

Термомеханическая обработка

Феррито-перлитная структура

Ковка

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье исследуется влияние деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) и последующей нормализации на механические свойства и микроструктуру низкоуглеродистой стали марки 10. Низкоуглеродистые стали широко применяются в машиностроении благодаря высокой пластичности, однако традиционные методы термической обработки слабо влияют на их прочность. Сталь марки 10, с несколько повышенным содержанием углерода, более восприимчива к термообработке, что позволяет оптимизировать соотношение прочности и пластичности. **Цель работы:** определить оптимальные параметры ДТЦО и нормализации для достижения наилучшего сочетания механических свойств листовой стали марки 10. **В работе исследованы** образцы стали 10, произведенной на ОАО «НКМК». **Методы исследования.** Анализ химического состава выполнялся с использованием эмиссионного спектрометра ARL 4460. Образцы подвергались циклической ковке (ДТЦО) на гидравлическом прессе, а затем прокатке до толщины 3 мм. Механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и сужение) определялись на испытательной машине Instron 3369. **Результаты и обсуждение.** Результаты показали, что ДТЦО приводит к измельчению зерна и снижению текстуры, что улучшает пластичность. Оптимальная температура нормализации составляет 900 °С, она обеспечивает наилучшее соотношение прочности и пластичности как для традиционно обработанной, так и для обработанной ДТЦО стали. При этом ДТЦО незначительно повышает прочность, но существенно увеличивает относительное удлинение (на 15 %) и относительное сужение (на 11 %). Последующая нормализация стали, подвергнутой ДТЦО, значительно повышает пластичность (более чем на 50 %) при умеренном снижении прочности. Полученные данные позволяют оптимизировать технологический процесс для достижения желаемого баланса свойств.

Для цитирования: Влияние деформационной термоциклической обработки и нормализации на механические свойства листовой стали 10 / А.Н. Прудников, С.В. Галачиева, Б.Н. Абсадыков, Г.Х. Шарипзянова, Е.Н. Цыганко, В.В. Иванцовский // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 192–202. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-192-202.

*Адрес для переписки

Прудников Александр Николаевич, д.т.н., профессор
 Сибирский государственный индустриальный университет,
 ул. Кирова, 42,
 654007, г. Новокузнецк, Россия
 Тел.: +7 3843 74-89-93, e-mail: a.prudnikov@mail.ru

Введение

Низкоуглеродистые стали, например марок 05, 08 и 10 по ГОСТ 1050, являются предпочтительным конструкционным материалом в широком диапазоне температур от -40 до $+450$ °С благодаря своим превосходным пластическим свойствам. Эта группа сталей характеризуется отличной свариваемостью, устойчивостью к образованию флокенов и отсутствием отпускной хрупкости в процессе эксплуатации. Высокая пластичность делает эти стали незаменимыми при изготовлении деталей и узлов машин, требующих значительных пластических деформаций (например, при холодной штамповке, высадке, гибке и других видах обработки давлением). При этом следует отметить, что указанные стали обычно применяются для деталей и узлов с умеренными статическими нагрузками в условиях эксплуатации [1–3].

В обычной металлообработке низкоуглеродистые стали из-за низкого содержания в них углерода традиционно не подвергаются интенсивной термической обработке для повышения прочности. Это связано с тем, что стандартные методы термической обработки, такие как закалка и отпуск, оказывают незначительный эффект на прочностные характеристики таких сталей. Причина этого заключается в ограниченных возможностях изменения микроструктуры стали с низким содержанием легирующих элементов и углерода. Повышение прочности зачастую сопровождается существенным снижением пластичности, что делает подобный подход нецелесообразным для большинства применений. Низкоуглеродистые стали ценятся прежде всего за свою высокую пластичность и свариваемость, необходимые для различных методов обработки давлением [4, 5].

Однако сталь 10, содержащая немного больше углерода (0,07–0,14 %), представляет собой исключение из этого правила. Небольшое, но достаточное повышение содержания углерода открывает возможности для применения более эффективных методов термической обработки. Нормализация, закалка с высоким отпуском и отжиг оказывают заметное влияние на микроструктуру стали 10, приводя к более тонкому и равномерному распределению карбидов и, как следствие, к улучшению механических

свойств [6]. Эти методы позволяют регулировать баланс между прочностью и пластичностью, подбирая оптимальный режим обработки для конкретных условий эксплуатации. Применение этих методов позволяет получить сталь с улучшенными характеристиками прочности, не жертвуя существенно ее пластичностью [7–9].

Для дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик стали 10, в частности для достижения более высокого уровня прочности и устойчивости к усталостному разрушению, перспективным направлением является применение деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) в сочетании с последующей термической обработкой. ДТЦО, представляющая собой циклическое воздействие высоких температур и пластической деформации, позволяет добиться более тонкой и измельченной микроструктуры, уменьшить внутренние напряжения и улучшить равномерность свойств по сечению изделия [11–14]. Комбинирование ДТЦО с последующей нормализацией или закалкой с высоким отпуском позволяет получить сталь со значительно улучшенными механическими свойствами, оптимизированными для конкретных условий работы, что расширяет область применения низкоуглеродистых сталей.

Исследования [1–10] свидетельствуют о положительном влиянии ДТЦО не только на механические характеристики, но и на широкий спектр свойств материалов. Данный метод оказывает позитивный эффект на физические, технологические и эксплуатационные свойства разнообразных материалов, начиная от чугунов [15] и включая стали с различным химическим составом [1, 2, 16–18]. Эффективность ДТЦО также подтверждается исследованиями алюминиевых сплавов, в частности заэвтектических силуминов [4–6]. Этот комплексный подход позволяет оптимизировать внутреннюю структуру материала, создавая более благоприятные условия для распределения напряжений и повышения пластичности и прочности.

Механизмы улучшения свойств, достигаемые посредством ДТЦО, представляют собой сложный процесс перераспределения внутренних напряжений и структурных изменений в металле. В результате применение данного метода позволяет существенно повысить прочность, пластичность, коррозионную стойкость и долго-

вечность изделий. Использование ДТЦО в сочетании с последующей термической обработкой открывает новые перспективы для оптимизации свойств сталей, особенно при необходимости достижения баланса прочностных и пластических характеристик [19–20]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на выявление оптимальных режимов ДТЦО для достижения максимального эффекта, а также на конкретизацию влияния различных параметров обработки на структуру и механические свойства стали марки 10. Необходимо учитывать влияние ДТЦО и на другие эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость и усталостная прочность. В связи с этим было проведено исследование, направленное на изучение влияния режима ДТЦО, включающего в себя термоциклическую деформацию (ковку) при температуре выше точки АСЗ, а также влияния последующей нормализации на механические свойства листовой стали марки 10.

Цель работы заключалась в определении оптимальных параметров ДТЦО для достижения максимального улучшения механических характеристик стали 10, что позволит расширить область ее применения и создать более надежные и долговечные машиностроительные изделия. Для достижения поставленной цели было решено несколько **задач**, таких как изготовление об-

разцов и проведение механических испытаний, а также проведен анализ изменений механических свойств стали под воздействием ДТЦО. Полученные результаты позволят обоснованно применять ДТЦО для улучшения свойств листовой стали марки 10 и других низкоуглеродистых сталей.

Методы и материалы

В качестве исходного материала для исследования была выбрана сталь 10, произведенная на Новокузнецком металлургическом комбинате (ОАО «НКМК»). Выбор данной марки стали обусловлен ее широким применением в машиностроении и относительно невысокой стоимостью, что делает ее привлекательным объектом для изучения влияния различных методов обработки на механические и микроструктурные свойства. Для точного определения химического состава исследуемой стали был использован современный метод спектрального анализа. В частности, для определения количественного содержания различных элементов в стали применялся эмиссионный спектрометр ARL 4460. Полученные данные о химическом составе стали были использованы для сравнения с данными из литературы и для оценки соответствия химического состава стали заявленным стандартам (см. таблицу).

Химический состав обрабатываемой стали 10
Chemical composition of Steel 10 being treated

Марка стали	Содержание элементов, % (вес.)							
	C	Mn	Si	P	Cr	S	Cu	Ni
10	0,134	0,422	0,226	0,0139	0,048	0,0181	0,198	0,041

В ходе эксперимента, проведенного на ОАО «ЗСМК» (г. Новокузнецк), стальной сляб размером 900×700×500 мм подвергся циклической ковке методом однопроходной протяжки на гидравлическом прессе с усилием 20 МН. Процесс деформации проводился при температуре нагрева 1250 °С с выдержкой сляба в печи в течение двух часов до началаковки (без учета времени нагрева). Важно отметить, что время выдержки было выбрано для обеспечения равномерного прогрева сляба по всему объему. В процессе эксперимента было осуществлено 10 циклов деформации, что позволило достичь значитель-

ного изменения структуры и свойств исходного материала. В результате многократной деформации толщина заготовки после термоциклическойковки (ДТЦО) уменьшилась до 300...310 мм, демонстрируя существенную степень пластической деформации.

После проведения ДТЦО полученные заготовки подверглись дальнейшей обработке прокаткой на ОАО «НМЗ» им. А.Н. Кузьмина (г. Новосибирск). Прокатка производилась в соответствии с промышленным технологическим режимом с целью получения листового материала заданной толщины. В результате процесса

проката были получены листы толщиной 3 мм, обладающие измененными свойствами в сравнении с исходным слябом. Это изменение свойств является следствием комбинированного воздействия деформации и термической обработки, составляющих суть ДТЦО.

Для всесторонней оценки влияния деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) на свойства листовой стали были проведены комплексные механические испытания полученного материала. Использовались плоские образцы толщиной 3 мм, которые были изготовлены из листовой стали, прошедшей обработку ДТЦО и последующую прокатку. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Instron 3369. В ходе испытаний были определены ключевые механические характеристики полученной листовой стали. К ним относятся временное сопротивление разрыву (предел прочности); предел текучести; относительное удлинение и относительное сужение.

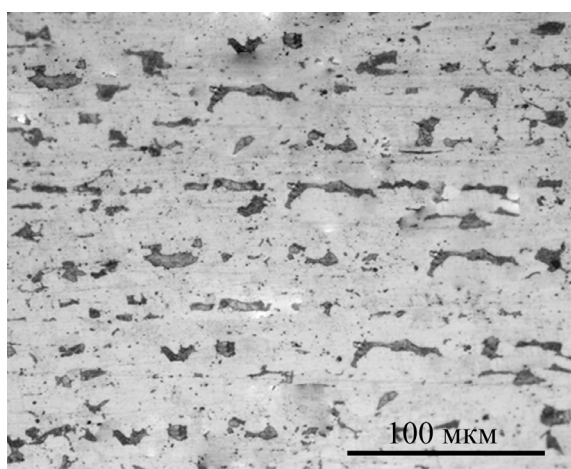
Более подробная информация о технологическом процессе производства листовой стали с применением ДТЦО, включая параметрыковки, режимы нагрева и охлаждения, а также параметры проката, приведены в работе [7].

Результаты и их обсуждение

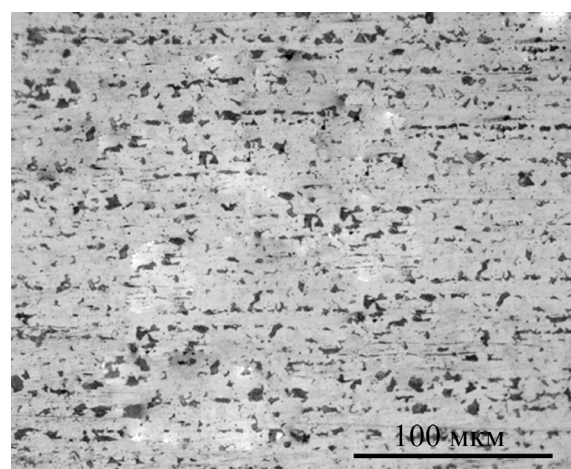
В предыдущем исследовании [2] было установлено, что применение предварительной термоциклическойковки перед процессом проката

листовой стали марки 10 способствует сохранению феррито-перлитной структуры (рис. 1). Важно отметить, что использование предварительной деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) оказывает существенное влияние на морфологию перлитных структур. В частности, наблюдается уменьшение размеров перлитных колоний, снижение их объемной доли и ослабление текстуры, выражающееся в уменьшении степени ориентировки перлитных колоний вдоль направления прокатки. Эти микроструктурные изменения, вызванные ДТЦО, приводят к заметному улучшению механических характеристик.

Более того, результаты исследования [2] показали, что применение ДТЦО перед прокаткой приводит к существенному (почти на 30 %) повышению прочности горячекатаной листовой стали марки 10. Это выражается в увеличении временного сопротивления разрыву с 370 до 478 МПа и предела текучести с 305 до 390 МПа (рис. 1). Следует подчеркнуть, что такое значительное повышение прочности достигается при незначительном, допустимом снижении пластических свойств материала. Применение предварительной деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) демонстрирует значительный потенциал для улучшения механических свойств стали марки 10, что делает этот метод весьма перспективным в промышленном применении. Достигаемое повышение прочности не является случайным следствием обработки,



a



б

Рис. 1. Микроструктура исследуемых образцов из стали 10 (толщина листа 3 мм), полученных с помощью промышленной технологии (*a*) и с помощью термоциклическойковки (*б*)

Fig. 1. Microstructure of the studied samples made of Steel 10 (sheet thickness 3 mm) obtained using industrial technology (*a*) and using thermal cycling forging (*b*)

а обусловлено фундаментальными изменениями в микроструктуре материала. Эти изменения, в свою очередь, значительно влияют на механизмы деформации и разрушения стали.

В основе повышения прочности, достигаемого с помощью ДТЦО, лежат два ключевых микроструктурных эффекта. Во-первых, ДТЦО способствует измельчению зеренной структуры стали. Более мелкое зерно означает увеличение площади границ зерен, которые действуют как препятствия для движения дислокаций – основных носителей пластической деформации [2]. Это затрудняет пластическую деформацию и, следовательно, повышает прочность материала. Более мелкое зерно также способствует повышению предела текучести и твердости стали. Во-вторых, ДТЦО эффективно уменьшает текстуру материала. Текстура, или предпочтительная ориентация кристаллитов, часто возникает в процессе обработки металлов давлением и может приводить к анизотропии механических свойств. Уменьшение текстуры, достигаемое с помощью ДТЦО, приводит к более изотропному материалу с более равномерными свойствами во всех направлениях. Это улучшает сопротивляемость стали к деформации и повышает ее надежность в условиях сложного напряженного состояния. Таким образом, сочетание измельчения структуры и уменьшения текстуры, достигаемое за счет ДТЦО, обеспечивает комплексное улучшение механических свойств, значительно увеличивая прочность и сохраняя высокую пластичность стали. Это делает ДТЦО эффективным инструментом для повышения качества и расширения области применения стали 10.

В продолжение этого исследования было изучено влияние температуры нормализации на структуру и механические свойства листовой горячекатаной стали марки 10, изготовленной как по традиционному промышленному режиму, так и с применением ДТЦО. Эксперименты проводились в диапазоне температур нормализации от 600 до 1000 °С с выдержкой при каждой температуре в течение 10 часов. Длительная выдержка обеспечивала достижение термодинамического равновесия при заданной температуре. Результаты исследования показали, что изменение температуры нормализации существенно влияет на микроструктуру стали [2], причем наибольшее влияние оказывает повышение температуры.

Было установлено, что с увеличением температуры нормализации до 900 °С происходит заметное измельчение перлитных колоний в структуре стали. Это, в свою очередь, оказывает влияние на механические свойства, что требует дальнейшего изучения корреляций между температурно-временным режимом нормализации и изменением прочностных и пластических свойств. Дополнительные исследования позволят оптимизировать технологический процесс с целью достижения максимального эффекта от применения ДТЦО и последующей нормализации.

Процесс структурных изменений в стали под воздействием нормализации протекает с различной интенсивностью в зависимости от предварительной обработки. Было установлено, что сталь, подвергнутая предварительной ковке, демонстрирует более активные структурные перестройки при нормализации, чем сталь, не подвергавшаяся ковке. Это связано с более высокой плотностью дислокаций и большей энергией деформации, накопленной в структуре стали послековки. Структурные дефекты являются зародышевыми центрами для образования новых зерен при высоких температурах нормализации.

Повышение температуры нормализации до 1000 °С приводит к росту размеров зерна и, как следствие, к огрублению структуры стали независимо от того, применялась ли предварительная ДТЦО или нет. Это обусловлено процессами рекристаллизации и роста зерен при высоких температурах. Огрубление структуры сопровождается снижением прочностных характеристик и увеличением пластичности материала. Таким образом, существует оптимальная температура нормализации, при которой достигается наилучшее сочетание прочностных и пластических свойств.

Анализ полученных результатов (рис. 2, а, б), демонстрирующих влияние температуры нормализации на свойства горячекатаной стали марки 10, выявил оптимальную температуру для этого процесса: 900 °С. При такой температуре достигается наиболее благоприятное сочетание прочностных и пластических характеристик как для стали, произведенной по стандартной технологии, так и для стали, предварительно подвергнутой деформационной термоциклической обработке. Примечательно, что использование ДТЦО не приводит к существенному росту прочностных показателей по сравнению с тра-

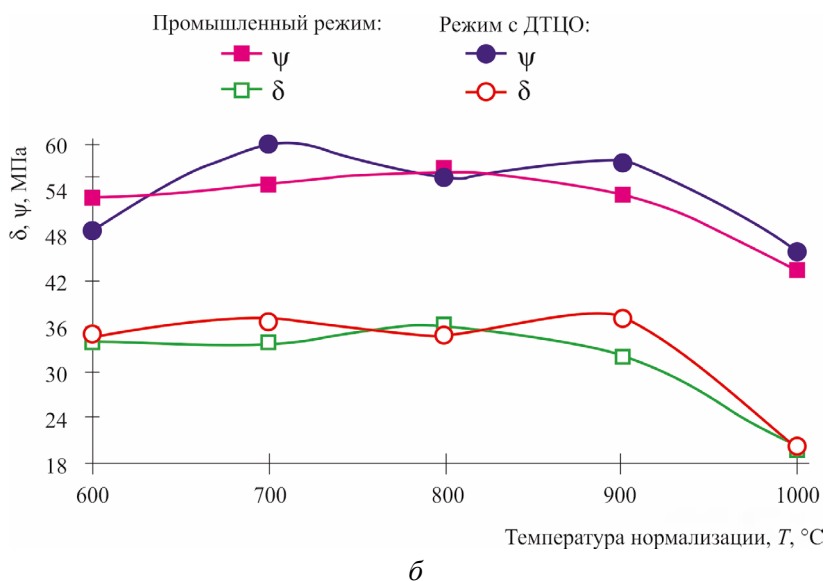
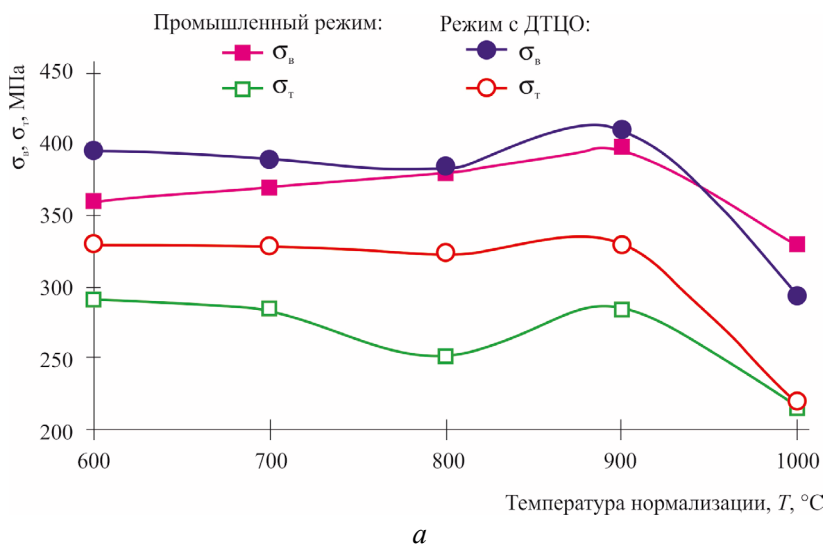


Рис. 2. Влияние температуры нормализации (время 10 ч) на механические характеристики листовой горячекатаной стали 10, изготовленной по промышленному режиму и с использованием ДТЦО:

$$a - \sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{т}}; \delta - \delta, \psi$$

Fig. 2. Influence of normalizing temperature (duration 10 hours) on the mechanical properties of hot-rolled Steel 10 sheet, manufactured according to the industrial mode and using DCT:

$$a - \sigma_{\text{u}}, \sigma_{\text{y}}; \delta - \delta, \psi$$

диционной горячекатаной стали. Однако отмечается значительный прирост пластичности. Конкретно наблюдается повышение относительного удлинения приблизительно на 15 % и относительного сужения на 11 % при использовании ДТЦО. Такие существенные улучшения пластических характеристик наглядно демонстрируют потенциал ДТЦО в качестве метода повышения пластичности стали без значительного ухудшения прочности. Это важный результат, так как

многие технологические процессы, например холодная штамповка или глубокая вытяжка, требуют высокой пластичности материала без существенного уменьшения прочности.

Полученные данные позволяют предположить, что ДТЦО изменяет микроструктуру стали таким образом, что увеличивает ее способность к пластической деформации. Это, вероятно, связано с уменьшением внутренних напряжений и перераспределением фазового состава стали,

что обеспечивает более равномерное распределение деформации по объему материала. В целом результаты исследования подтверждают целесообразность применения ДТЦО в сочетании с нормализацией для получения листовой стали марки 10 с улучшенным балансом прочностных и пластических свойств, особенно если конечный продукт должен обладать высокой пластичностью.

Последующая нормализация стали, предварительно обработанной методом ДТЦО, вызывает существенные изменения ее свойств. Наблюдается снижение прочностных характеристик примерно на 15 %, что указывает на уменьшение сопротивления деформации. Параллельно с этим пластичность стали значительно возрастает – более чем на 50 % по сравнению с исходным горячекатаным состоянием. Такое изменение свойств объясняется микроструктурными перестройками, происходящими в процессе нормализации после ДТЦО. Дополнительная термическая обработка приводит к дальнейшему измельчению кристаллической структуры, что, в свою очередь, снижает прочность, но значительно повышает пластичность. Кроме того, процесс нормализации эффективно снимает остаточные напряжения, накопленные в стали в процессе ДТЦО. Снятие этих напряжений способствует улучшению пластичности, делая материал более податливым к дальнейшей обработке давлением. Таким образом, комбинированное воздействие ДТЦО и нормализации позволяет получить высокопластичный материал, что может быть особенно ценно при производстве деталей, требующих значительных пластических деформаций. Значительное повышение пластичности может быть особенно важным в тех случаях, когда требуются высокие показатели пластической деформации при обработке металла давлением. Следовательно, выбор оптимальной температуры нормализации и предварительной обработки (ДТЦО) позволяет целенаправленно регулировать соотношение прочности и пластичности стали марки 10 в соответствии с требованиями конкретного применения.

Тщательный анализ полученных данных о механических свойствах, сопоставленный с данными о технологическом процессе, позволил определить оптимальные параметры ДТЦО, обеспечивающие достижение требуемых механических характеристик конечного продукта.

Это включает в себя не только выбор оптимальных параметровковки, таких как температура и степень деформации, но и оптимизацию режимов последующей термической обработки, чтобы обеспечить наилучшее сочетание прочности, пластичности, ударной вязкости и других необходимых свойств для конкретных условий эксплуатации изделий из данной стали. На основе полученных результатов возможно разработать рекомендации для промышленного внедрения ДТЦО с целью повышения качества и эксплуатационных характеристик листовой стали марки 10.

Выводы

Проведенное исследование показало, что применение деформационной термоциклической обработки (ДТЦО) в сочетании с последующей нормализацией позволяет эффективно управлять механическими свойствами листовой стали марки 10, расширяя тем самым область ее применения.

Предварительная ДТЦО, несмотря на незначительное повышение прочности (примерно 30 %), приводит к значительному увеличению пластичности горячекатаной стали марки 10. Относительное удлинение и относительное сужение возрастают приблизительно на 15 и 11 % соответственно. Это делает ДТЦО перспективным методом для получения стали с улучшенным сочетанием прочности и пластичности, особенно важных для процессов холодной обработки давлением.

Данное исследование подтверждает высокую эффективность применения ДТЦО как метода предварительной обработки листовой стали марки 10 перед последующей нормализацией. Комбинированное воздействие этих методов позволяет достичь значительного улучшения пластических свойств при сохранении приемлемых прочностных характеристик. Полученные результаты открывают новые возможности для оптимизации технологического процесса производства листовой стали марки 10, расширяя диапазон ее применения в машиностроении и других отраслях.

Список литературы

1. Prudnikov A.N., Prudnikov V.A. Hardening low carbon steel 10 by using of thermalcyclic deformation and subseautent heat treatment // Materials Science.



Nonequilibrium Phase Transformations. – 2016. – Vol. 2 (4). – P. 10–13.

2. *Prudnikov A.N., Popova M., Prudnikov V.A.* Influence of thermal-cyclic deformation and hardening heat treatment on the structure and properties of steel 10 // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 187–193. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.187.

3. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole / M.V. Konstantinova, A.A. Olentsevich, V.Y. Konyukhov, E.A. Guseva, V.A. Olentsevich // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1064 (1). – P. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012020.

4. *Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V.* Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 912–916. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.

5. *Konyukhov V.Yu., Permyakova D.N., Oparina T.A.* Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – 2032 (1). – P. 012071. – DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012071.

6. Research and analysis of the low-temperature potential of heat networks / A.G. Batukhtin, M.V. Kobylkin, Y.O. Rikker, S.G. Batukhtin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 791 (1). – P. 012039. – DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012039.

7. *Martyushev N.V., Petrenko Y.N.* Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 174–178. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.

8. *Martyushev N.V.* Alignment of the microstructure of castings from the heterophase lead bronzes // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 163–167. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.163.

9. The influence of non-vacuum electron-beam facing on the structure of Ti–Ta layers formed on the surface of VT1-0 alloy / V.V. Samoilenko, O.G. Lenivtseva, I.A. Polyakov, I.S. Laptev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 124 (1). – P. 012117. – DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012117.

10. *Татаурова Э.В.* Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства углеродистых сталей // *Металлы*. – 2002. – № 1. – С. 82–87.

11. *Plotnikova N.V., Skeebe V.Y.* Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when

high-energy heating by high-frequency currents // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 156. – P. 012022. – DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.

12. *Nekrasova T.V., Melnikov A.G., Martyushev N.V.* Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface. // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 379. – P. 77–81. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.

13. *Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V.* Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 712. – P. 105–111. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.

14. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants / A.G. Batukhtin, E.A. Makhov, M.S. Bass, S.G. Batukhtin // *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*. – 2023. – Vol. 15 (57). – P. 351–361.

15. *Konyukhov V.Y., Permyakova D.N., Oparina T.A.* Perspective for the use of industrial waste in lubricating compositions to reduce wear in friction pairs // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012046.

16. *Batukhtin A.* Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 9 (7). – P. 1300–1320.

17. Green building as a tool of energy saving / A.M. Gladkih, V.Yu. Konyuhov, I.I. Galyautdinov, E.I. Shchadova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 350. – P. 012032.

18. Calculations of efficiency in implementing progressive mold forming methods / V.Yu. Konyuhov, A.M. Gladkih, I.I. Galyautdinov, E.I. Shchadova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 760. – P. 012027.

19. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening / A.E. Balanovsky, M.G. Shtayger, M.V. Grechneva, V.V. Kondrat'ev, A.I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 411. – P. 012012.

20. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production / V.V. Kondrat'ev, V.A. Ershov, S.G. Shakhrai, N.A. Ivanov, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2016. – Vol. 60 (7–8). – P. 877–882.

Конфликт интересов

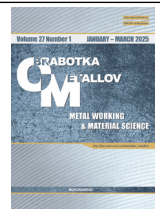
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Effect of deformation thermocyclic treatment and normalizing on the mechanical properties of sheet Steel 10

Alexander Prudnikov^{1, a, *}, Svetlana Galachieva^{2, b}, Bakhyt Absadykov^{3, c}, Guzel Sharipzyanova^{4, d},
 Elena Tsyganko^{5, e}, Vladimir Ivancivsky^{6, f}

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44 Nikolaev str., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

³ K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University, 2 Satbaev st., Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan

⁴ Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow, 107023, Russian Federation

⁵ Admiral Ushakov State Maritime University, 93, Lenin Ave., Novorossiysk, 353924, Russian Federation

⁶ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-4150-7428>, a.prudnikov@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-7193-0454>, info@skgmi-gtu.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0001-7829-0958>, absadykov@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-0863-7490>, guzel@mtw.ru;

^e <https://orcid.org/0000-0002-5920-8688>, lana_tsyganko@mail.ru; ^f <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>, ivancivskij@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 06 December 2024

Revised: 30 December 2024

Accepted: 23 January 2025

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Steel 10

Deformation thermocyclic treatment (DCT)

Normalization

Mechanical properties

Strength

Plasticity

Hot-rolled steel

Elongation

Reduction of area

Optimal mode

Thermomechanical treatment

Ferrite-pearlite structure

Forging

Acknowledgements

The research was carried out at the equipment of the Engineering Center "Design and Production of High-Tech Equipment" and the shared research facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. This paper investigates the influence of deformation thermocyclic treatment (DCT) and subsequent normalizing on the mechanical properties and microstructure of low-carbon *Steel 10*. Low-carbon steels are widely used in engineering due to its high ductility; however, traditional heat treatment methods have a limited effect on its strength. *Steel 10*, with slightly increased carbon content, is more susceptible to heat treatment, which allows for optimizing the balance between strength and ductility. **The purpose of the work** is to determine the optimal parameters of DCT and normalizing for achieving the best combination of mechanical properties of sheet steel *Steel 10*. In this work, *Steel 10* samples, produced by OJSC "NKMC", were studied. **The methods of investigation** include the analysis of the chemical composition using an emission spectrometer *ARL 4460*. Samples were subjected to cyclic forging (DCT) on a hydraulic press, followed by rolling to a thickness of 3 mm. Mechanical properties (tensile strength, yield strength, elongation, and reduction of area) were determined using a testing machine *Instron 3369*. **Results and Discussion.** The results showed that DCT leads to grain refinement and texture reduction, which improves ductility. The optimal normalizing temperature is 900°C, providing the best combination of strength and ductility for both conventionally treated and DCT-treated steel. At the same time, DCT slightly increases the strength but significantly increases the elongation (by 15 %) and the reduction of area (by 11%). Subsequent normalizing of the DCT-steel significantly increases ductility (by more than 50 %) and reduces strength. The data obtained allow for optimizing the technological process to achieve the desired balance of properties.

For citation: Prudnikov A.N., Galachieva S.V., Absadykov B.N., Sharipzyanova G.Kh., Tsyganko E.N., Ivancivsky V.V. Effect of deformation thermocyclic treatment and normalizing on the mechanical properties of sheet Steel 10. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 192–202. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-192-202. (In Russian).

* Corresponding author

Prudnikov Alexander N., D.Sc. (Engineering), Professor
 Siberian State Industrial University,
 42 Kirov st.,
 654007, Novokuznetsk, Russian Federation
 Tel.: +7 3843 74-89-93, e-mail: a.prudnikov@mail.ru

References

1. Prudnikov A.N., Prudnikov V.A. Hardening low carbon steel 10 by using of thermalcyclic deformation and subseautent heat treatment. *Materials Science. Nonequilibrium Pahse Transformations*, 2016, vol. 2 (4), pp. 10–13.
2. Prudnikov A.N., Popova M., Prudnikov V.A. Influence of thermal-cyclic deformation and hardening heat treatment on the structure and properties of steel 10. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 187–193. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.788.187.
3. Konstantinova M.V., Olentsevich A.A., Konyukhov V.Y., Guseva E.A., Olentsevich V.A. Automation of failure forecasting on the subsystems of the railway transport complex in order to optimize the transportation process as a whole. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1064 (1), p. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/1064/1/012020.
4. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 912–916. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912.
5. Konyukhov V.Yu., Permyakova D.N., Oparina T.A. Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2032 (1), p. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012071.
6. Batukhtin A.G., Kobylkin M.V., Rikker Y.O., Batukhtin S.G. Research and analysis of the low-temperature potential of heat networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 791 (1), p. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012039.
7. Martyushev N.V., Petrenko Y.N. Effects of crystallization conditions on lead tin bronze properties. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 174–178. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.174.
8. Martyushev N.V. Alignment of the microstructure of castings from the heterophase lead bronzes. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 163–167. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.163.
9. Samoylenko V.V., Lenivtseva O.G., Polyakov I.A., Laptsev I.S. The influence of non-vacuum electron-beam facing on the structure of Ti–Ta layers formed on the surface of VT1-0 alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124 (1), p. 012117. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012117.
10. Tataurova E.V. Vliyanie termotsiklicheskoi obrabotki na strukturu i svoistva uglerodistykh staley [Effect of thermocycling on structure and properties of carbon steels]. *Metally = Metals*, 2002, no. 1, pp. 82–87.
11. Plotnikova N.V., Skeebe V.Y. Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 156, p. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/156/1/012022.
12. Nekrasova T.V., Melnikov A.G., Martyushev N.V. Creation of ceramic nanocomposite material on the basis of ZrO_2 - Y_2O_3 - Al_2O_3 with improved operational properties of the working surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 77–81. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.77.
13. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 712, pp. 105–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105.
14. Batukhtin A.G., Makhov E.A., Bass M.S., Batukhtin S.G. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2023, vol. 15 (57), pp. 351–361.
15. Konyukhov V.Y., Permyakova D.N., Oparina T.A. Perspective for the use of industrial waste in lubricating compositions to reduce wear in friction pairs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2061, p. 012046.
16. Batukhtin A. Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9 (7), pp. 1300–1320.
17. Gladkih A.M., Konyuhov V.Yu., Galyautdinov I.I., Shchadova E.I. Green building as a tool of energy saving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 350, p. 012032.
18. Konyuhov V.Yu., Gladkih A.M., Galyautdinov I.I., Shchadova E.I. Calculations of efficiency in implementing progressive mold forming methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 760, p. 012027.

19. Balanovsky A.E., Shtayger M.G., Grechneva M.V., Kondrat'ev V.V., Karlina A.I. Comparative metallographic analysis of the structure of St3 steel after being exposed to different ways of work-hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 411, p. 012012.

20. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A., Karlina A.I. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production. *Metallurgist*, 2016, vol. 60 (7–8), pp. 877–882.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).