

УДК 621.039.53

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-2-39-46

Параметры микропластической деформации высокопрочной нержавеющей стали, их связь с механическими свойствами

В. Б. Дементьев, доктор технических наук, профессор, УдмФИЦ УРО РАН, Ижевск, Россия

Т. М. Махнева, доктор технических наук, доцент, УдмФИЦ УРО РАН, Ижевск, Россия

А. В. Чуркин, кандидат технических наук, УдмФИЦ УРО РАН, Ижевск, Россия

Определение механических свойств материала всегда является важным и обязательным моментом оценки работоспособности конструкции. Существующие методы и стандарты требуют соблюдения ряда норм и условий при подготовке, изготовлении и испытании образцов, что делает определение механических характеристик операцией трудоемкой. Кроме того, используемые ГОСТы, ОСТы и методики предопределяют использование металлоемких образцов, отбор которых сопровождается нарушением сплошности изделия, а в случае наличия технологического припуска механические характеристики оцениваются с определенной степенью достоверности. Благодаря развитию теории дефектов кристаллической решетки к настоящему времени картина пластической деформации и разрушения описывается физически обоснованным анализом механизма протекающих в материале процессов. Для оценки и прогнозирования разработан и успешно применяется надежный способ (метод) определения механических свойств по параметрам микропластической деформации (МПД) на миниатюрных образцах при сжатии. Метод основан на релаксации напряжений в локальных объемах деформированного материала образца исследуемой стали. Основным преимуществом метода является определенный физический смысл параметров, проявление которых обусловлено сменой механизма МПД материала при малых нагрузках. С целью внедрения в практику эксперимента вышеописанного способа было проведено сравнение механических свойств с параметрами микропластичности на примере промышленной высокопрочной стали после упрочняющей термообработки. Получены параметры микропластической деформации для стали марки 08X15H5Д2Т и их изменение в зависимости от температуры старения T_c . Параметры σ°_2 и σ'' , интерпретируемые как пределы упругости и текучести соответственно, увеличиваются в интервале температур выделения дисперсной упрочняющей эpsilon-фазы (ϵ) при старении. При сравнении полученных параметров с существующими стандартными характеристиками исследуемой стали установлено, что между параметром МПД и величиной предела текучести $\sigma_{0,2}$ существует корреляция: построенные зависимости $\sigma'' = f(T_c)$ повторяют характер изменения кривой предела текучести $\sigma_{0,2} = f(T_c)$ независимо от исходного состояния стали.

Ключевые слова: высокопрочная нержавеющая сталь, предел упругости, предел текучести, термообработка, параметры микропластической деформации.

Введение

Одной из задач материаловедения является создание материалов с заданным комплексом прочностных и пластических свойств, обеспечивающим качество и надежность эксплуатации изделий из них. Появление в последние десятилетия азотистых высокопрочных сплавов, аморфных, наноструктурированных высокопрочных материалов и всевозрастающее использование их в отечественных современных конструкциях потребовало развития более совершенных методов оценки их структуры и свойств.

Используемые характеристики механических свойств материалов, кроме предела текучести, фактически все являются условными, то есть зависящими от принятых допусков на деформацию, условий деформации, формы образца, чистоты его поверхности и др., или по существу являются технологическими пробами. Поэтому другой важной задачей является контроль механических свойств материала непосредственно в процессе длительных интенсивных эксплуатационных воздействий. Жесткие условия эксплуатации и повышение требований к технологическим свойствам сталей и сплавов усиливают актуальность исследований в этом направлении.

Корректную оценку состояния материала ответственных высоконагруженных объектов для повышения эффективности контроля и расчета ресурса его безаварийной работы позволяют проводить внедренные в практику контроля разработанный стандарт (ГОСТ Р 57173–2016) и методика оценки важнейших механических характеристик по результатам испытаний миниатюрных образцов на релаксацию напряжений при сжатии. Параметры релаксационных кривых, имея определенный физический смысл и отвечающие за смену (изменение) механизма пластической деформации, хорошо коррелируют с механическими свойствами сталей и сплавов, как с ОЦК-, так и с ГЦК-решеткой [1–3].

В области использования параметров микропластичности для оценки технического состояния материала конструкций и изделий достигнуты значительные успехи [4–14]. Внедрение методики в практику исследований позволило по параметрам МПД осуществить, в частности, контроль механических свойств материалов реакторного оборудования, что обусловило такие преимущества перед условными характеристиками, как повышение точности контроля, снижение трудоемкости, повышение оперативности, объективности, а также улучшение усло-

вий безопасности. При этом определено начало разрушения трубных сталей, оценена живучесть материала при эксплуатации лопаток турбин, созданы модели микропластичности, решен ряд вопросов, касающихся оценки неоднородности структур [7], критериев оценки корреляционных параметров эксплуатационных свойств материалов, прогнозирования усталости и долговечности [8].

Представляло интерес провести оценку механических свойств по физическим параметрам МПД низкоуглеродистой (0,02...0,06 %) высоколегированной стали.

Цель настоящей работы – определение физических параметров микропластической деформации (МПД) и установление их взаимосвязи с пределом упругости и текучести высокопрочной нержавеющей стали после упрочняющей обработки (закалки и старения).

Использованные в тексте обозначения

σ° – напряжение, соответствующее микроупругости и микропластическим процессам;

σ' – напряжения переходной области от микро- к макропластическим процессам;

σ'' – напряжения, соответствующие макроупругости;

$\Delta\sigma_p$ – релаксация напряжения;

$\Delta\sigma^\circ$ – величина релаксации напряжений в области σ° ;

$\Delta\sigma'$ – величина релаксации напряжений в области σ' ;

$\Delta\sigma''$ – величина релаксации напряжений в области σ'' ;

σ_n – прикладываемое напряжение;

$\Delta\sigma_n$ – шаг нагружения;

$\sigma_{0,2}$ – напряжения, соответствующие деформации $\varepsilon = 0,2\%$ – условный предел текучести.

Механизмы микропластической деформации

Автором определено «явление микропластичности», отражающего неоднородность протекания пластической деформации в отдельных объемах материала, является известный ученый Н. Н. Давиденков.

К настоящему времени доказана гипотеза о существовании в реальных кристаллах весьма подвижных дислокаций, ответственных за развитие пластической деформации. Известно также, что процесс пластической деформации металлов на любом уровне приложенных рабочих напряжений является локальным по своей природе и определяется особенностями их кристаллического строения [9–13].

Различают два механизма пластической деформации – сдвиговой и диффузионный. В кристаллических веществах *сдвиговая* пластическая деформация проявляется в некоторой ограниченной области кристалла (локально) и распространяется путем эстафетного движения атомов кристаллической решетки вдоль определенных кристаллографических плоскостей и направлений. Однако при пластической деформации нарушается правильность строения кристаллической решетки, и вследствие этого дальнейшее скольжение затрудняется. Тепловое движение атомов восстанавливает правильность строения и тем самым способствует распространению сдвиговой деформации.

В основе *диффузионной* пластической деформации лежат перемещения атомов, интенсивность которых описывается экспоненциальной зависимостью от температуры. Оба механизма в реальных условиях деформирования часто действуют одновременно, накладываясь друг на друга и взаимодействуя между собой [14].

Критические напряжения и их связь с механическими свойствами сталей.

Характеристика параметров

Из литературных источников известно, что в области микропластических деформаций чрезвычайно ярко проявляются свойства индивидуальных дислокаций. При увеличении прикладываемого напряжения происходят изменения дислокационных механизмов деформации, что отражается на приведенной схематически зависимости $\Delta\sigma_p = f(\sigma_n)$, где σ_n – прикладываемое напряжение, $\Delta\sigma_p$ – релаксация напряжений (рис. 1).

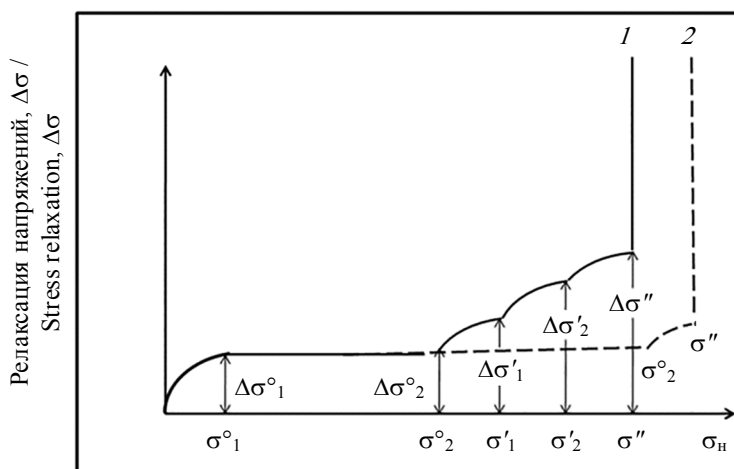


Рис. 1. Релаксационная кривая (схема)

Fig. 1. Relaxation curve (schema)

Область микропластической деформации на релаксационной кривой (рис. 1, кривая 1), ограниченная напряжением σ'' , многостадийна и разделена критическими напряжениями σ°_1 , σ°_2 , σ'_1 , σ'_2 , каждому из которых соответствует свой уровень и интенсивность возрастания величины релаксации напряжений $\Delta\sigma^{\circ}_1$, $\Delta\sigma^{\circ}_2$, $\Delta\sigma'_1$, $\Delta\sigma'_2$ и σ'' . Участок релаксационной кривой (от σ°_1 до σ°_2) определяется как участок микропластической деформации, а участок (от σ°_2 до σ'') является переходным из области микропластической деформации к макропластической.

Напряженность первой из них существенно зависит от структурного состояния стали и возрастает обычно при повышении прочности стали, поглощая при этом некоторые стадии в переходной области, как показано на рисунке 1 (кривая 2). До достижения определенной величины напряжения σ°_1 наблюдается лишь расширение дислокационных петель. Следовательно, до напряжения σ°_1 в образце проявляется малоупругая деформация, и это *критическое напряжение* определяется как предел микроупругой области. Релаксация напряжений в этой области остается постоянной (см. рис. 1).

Переход через критическое напряжение σ°_1 приводит к необратимой перестройке микроструктуры, которая может быть следствием взаимодействия дислокаций с примесями, диффундирующими к зоне растяжения дислокаций, или следствием увеличения доли устойчивых дислокаций в сильно растянутой петле. Пластическая деформация при этих напряжениях идет за счет скольжения краевых дислокаций. На зависимости $\Delta\sigma_p = f(\sigma_n)$ наблюдается второе *критическое напряжение* и второй линейный участок с большой величиной $\Delta\sigma^{\circ}_2$, которая характеризует сопротивление матрицы материала малым деформациям (рис. 1, кривые 1 и 2). В данном случае наличие линейного участка с неизменной величиной $\Delta\sigma^{\circ}_2$ определяется присутствием в матрице эффективных препятствий для движения дислокаций в виде барьеров Пайерлса, примесей и структурных дефектов.

При увеличении нагрузки и достижения критического напряжения σ_2 начинается движение винтовых дислокаций и преодоление ими когерентных частиц. При этом плотность дислокаций в плоском скоплении достигает критической величины, и начинается множественное скольжение, следствием которого является увеличение доли пластической деформации, следовательно, и увеличение величины релаксации напряжений $\Delta\sigma_p$.

Участок релаксационной кривой (от σ°_1 до σ°_2) определяется как участок микропластической деформации, а участок (от σ°_2 до σ'') является переходным из области микропластической деформации к макропластической. В интервале параметров ($\sigma^{\circ}_2 \dots \sigma''$) появляются *критические* напряжения σ' . Их несколько: σ'_1 , σ'_2 , (редко больше). Это может быть связано с частичным стартом винтовых дислокаций. Таким образом:

- параметр σ°_1 – истинный предел упругости, обнаруживается редко, если в исходном материале отсутствуют «большие сегменты» свободных (незакрепленных) дислокаций;

- параметр σ°_2 – преодоление краевыми компонентами дислокаций «сильных» препятствий в виде выделений вторых фаз (особенно когерентных), зон предвыделения (ГП-зон), локальных химических неоднородностей, стабильных дислокационных образований (клубков) и др. При этом происходит разблокировка первичных систем скольжения вследствие прохождения дислокаций. Возрастающие сдвиги части кристалла на границах зерен вызывают отдельные акты передачи деформации от зерна к зерну, начинается формирование полосы Людерса и ее развитие на дальнейших этапах пластической деформации;

- параметры σ'_1 , σ'_2 – начало кооперативной деформации зерен по всем деформируемым объемам образца;

- параметр σ'' – *критическое* напряжение, при достижении которого резко возрастает величина релаксации напряжения, объясняемая началом лавинного процесса передачи деформации. Еще более интенсифицируется сдвиг по первичным системам за счет развитого поперечного и двойного поперечного скольжений, интенсивного размножения дислокаций, как в первичных, так и в других системах скольжения. Этот процесс приводит к завершению формирования полосы Людерса, которая распространяется на всё сечение образца.

Очевидно, что параметр σ'' предшествует параметру $\sigma_{0,2}$ (если таковой есть), а также σ'' может быть больше, меньше или равным *условному* пределу текучести $\sigma_{0,2}$ (в зависимости от заданного допуска на деформацию и условий испытания). Рассмотренные процессы, происходящие при деформировании образца до предела текучести, положены в основу метода определения параметров микропластической деформации на небольших образцах при сжатии (ГОСТ Р 57173–2016).

Материал и методы исследования

Материалом для исследования служили образцы высокопрочной нержавеющей стали (ВНС2) марки 08X15H5Д2Т, деформированной в холодном состоянии [15–17]. Перед холодной деформацией образцы проходили двойной отжиг в двухфазной ($\alpha + \gamma$)-области по режиму: 660 °С, 6 ч, воздух (2 раза). Холодную деформацию производили на прутковом стане до размера диаметром \varnothing 4 мм. После термообработки готовили образцы для исследования размером \varnothing 3,5×6 мм. Структура стали двухфазная. Упрочняемая при старении выделяющимися по механизму дисперсионного твердения фазами сталь относится к классу мартенситно-стареющих с небольшим количеством аустенита [15, 17]. Термическая обработка заключалась в закалке с температуры 1000 °С и старении в интервале температур 350...500 °С с выдержкой 20 мин при каждой температуре.

Исследование проводилось при комнатной температуре с помощью автоматизированной системы измерения параметров микропластической деформации (АС-ПМД). Схема нагружения образца при испытаниях приведена на рисунке 2. Образцы устанавливали на пресс. Нагрузка производилась до предела

текучести ступенчато путем сжатия. Величина прикладываемого напряжения на каждой ступени увеличивалась на $\Delta\sigma_n$, равное 20 МПа. Время нагружения составляло 0,3 с, время релаксации – 60 с. Для каждого образца строилась релаксационная кривая (пример на рис. 3).

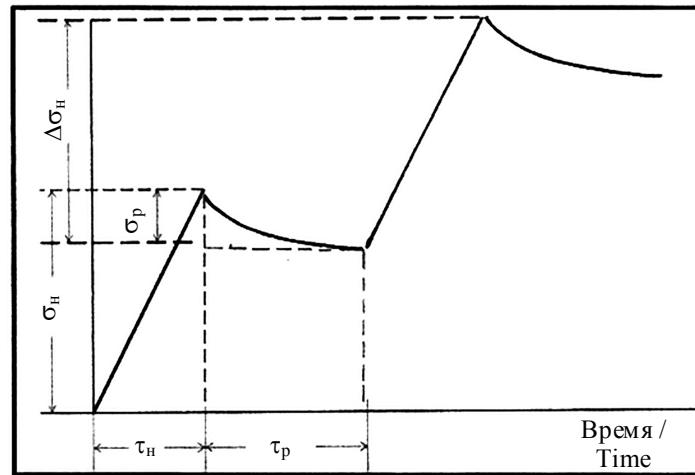


Рис. 2. Схема нагружения: σ_n – прикладываемое напряжение; σ_p – напряжение релаксации; τ_n – время нагрузки; τ_r – время релаксации; $\Delta\sigma_n$ – приращение нагрузки на постоянную величину

Fig. 2. Schema loading: σ_n – applied stress; σ_p – relaxation stress; τ_n – load time; τ_r – relaxation time; $\Delta\sigma_n$ – increment of load by a constant value

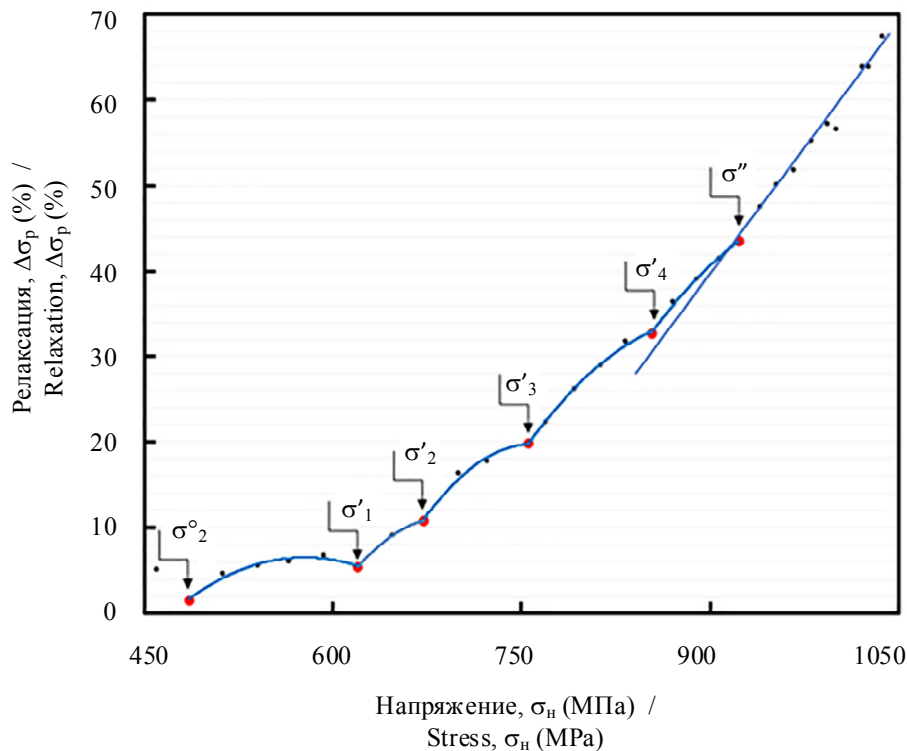


Рис. 3. Релаксационная кривая стали ВНС2 после закалки с температуры 1000 °С и последующего старения при температуре 425 °С. Критические напряжения σ_2^0, σ'' и параметры переходной зоны (σ'_{1-4}).

Fig. 3. Relaxation curve of steel VNC2 after quenching from 1000 °C and subsequent ageing at a temperature of 425 °C. Critical stresses σ_2^0, σ'' and transition zone parameters (σ'_{1-4})

Определение физических параметров микропластической деформации (МПД) после закалки и старения высокопрочной нержавеющей стали ВНС2 (08X15H5Д2Т). Установление взаимосвязи параметров с механическими свойствами. Результаты и обсуждение

Исследованию параметров МПД легированных высокопрочных сталей посвящены ряд работ, в которых оценены параметры МПД, использование которых с целью прогнозирования механических свойств при эксплуатации материала сталей приветствуется как для мартенситных сталей, так и для сталей с метастабильным аустенитом (17–20).

Параметры микропластической деформации исследуемой стали после закалки и последующего старения сведены в таблицу, а их изменение в зависимости от режима термообработки представлено на рисунке 4. Из таблицы видно, что все критические напряжения в образцах стали со структурой после закалки (мартенсит и аустенит) минимальны (1-я строка). Релаксация напряжений при различных температурах отпуска и старения свидетельствует о нескольких механизмах развития пластической деформации в исследуемой стали (см. табл., рис. 3 и 4).

Параметры микропластической деформации стали ВНС2 после закалки и старения, МПа · 10¹

Parameters of microplasticity of VNS2 steel depending on the heat treatment, MPa · 10¹

Режим / Mode, °C	σ_2°	σ_1'	σ_2'	σ_3'	σ_4'	σ''
1000	34	49	64			88
+350	40	46	60	77		90
+400	41	55	70	82		92
+425	50	56	68	84	95	104
+450	58	68	75	94	98	104
+475	68	80	86	92	102	100
+500	72	80	98			112
Обозначение / Designation	•	○	◆	▲	○	■

Релаксационная кривая $\Delta\sigma_{p(r)} = f\sigma_{n(load)}$ исследуемой стали после старения на максимум прочности (см. рис. 3) аналогична полученным в ранних работах ученых НГТУ имени Р. Е. Алексева и ННГУ имени Н. И. Лобачевского. Характерным для марок сталей ВКС210 и ВНС2 является стадийность, наличие прямолинейного участка на зависимости $\Delta\sigma_{p(r)} = f\sigma_{n(load)}$ и параметров МПД в переходной зоне, как и для металлов с матричной ОЦК-решеткой, к которым относится сталь ВНС2. При достижении значения $\Delta\sigma_2$ и выше релаксация напряжений непрерывно возрастает вплоть до деформации в макропластическую область.

Особенностью релаксационных кривых этой стали после отпуска и старения является присутствие в переходной зоне критических напряжений σ_3' и σ_4' , для интерпретации которых необходимо проведение дополнительного исследования структуры. При ступен-

чатом сжатии в интервале нагрузок 840...1080 МПа появление этих критических напряжений наблюдается уже при температуре отпуска 350 °C (см. табл., рис. 4). Трактовать предполагаемую природу полученных критических напряжений при температурах 350...475 °C без исследования структуры (металлографической, атомной) и информативных физических методик (электросопротивление, внутреннее трение, теплоемкость и др.) было бы некорректно.

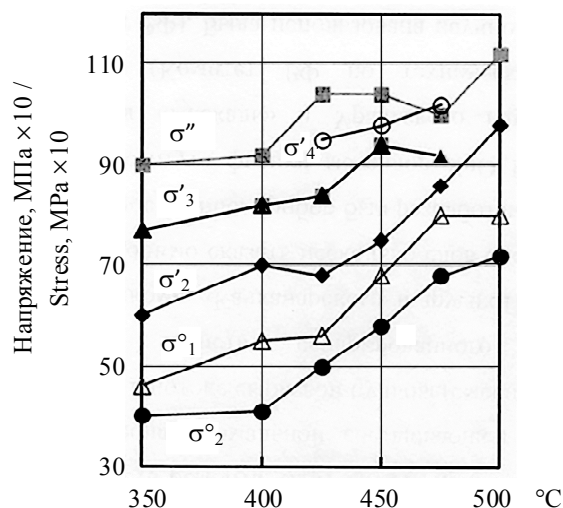


Рис. 4. Влияние температуры отпуска и старения (после закалки) на параметры микропластической деформации стали ВНС2. Закалка с температуры 1000 °C

Fig. 4. Effect of heat treatment mode on microplastic deformation parameters in steel VNS2. Quenching from 1000 °C

Из рисунка 4 также следует, что критические параметры σ_2° и σ'' практически не изменяются до температуры старения 400 °C. Начиная с этой температуры, резко увеличиваются все параметры МПД, достигая максимальных значений при нагреве до температуры 500 °C (см. табл.). Характер изменения критических напряжений нелинейный. Резкое изменение параметров σ'' и σ_2° в интервале температур старения 400...475 °C обусловлено, как известно, выделением по механизму дисперсионного твердения упрочняющей медьсодержащей ϵ -фазы. Рост параметров происходит до температур, при которых сохраняется когерентная связь между матрицей и выделяющейся ϵ -фазой. Когда эта связь нарушается, то есть ϵ -фаза существует уже самостоятельно как фаза со своей решеткой, параметр σ'' , отождествляемый с пределом текучести, либо замедляет свой рост, либо несколько снижается. Коагуляция мелкодисперсной ϵ -фазы после выдержки при температуре выше 475 °C приводит к дальнейшему, более значительному, увеличению параметров σ_2° и σ'' (рис. 4).

На рисунке 5 можно проследить за изменением полученных в работе параметров σ_2° , σ'' (1, 2) и предела текучести $\sigma_{0,2}$ промышленной стали (3, 4) в зависимости от исходного состояния.

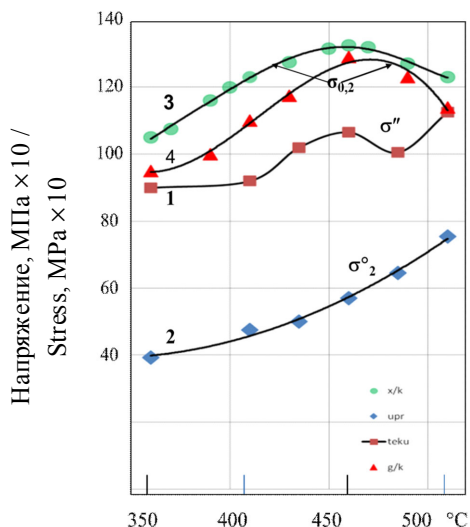


Рис. 5. Влияние исходного состояния перед закалкой на параметры микропластичности и предел текучести $\sigma_{0,2}$ стали ВНС2 после отпуска и старения: 1 – σ'' (отжиг); 2 – σ_2° ; 3 – $\sigma_{0,2}$ (лист); 4 – $\sigma_{0,2}$ (поковка)

Fig. 5. The effect of the initial state before quenching on the parameters of microplasticity and yield strength $\sigma_{0,2}$ of steel VNC2 after tempering and aging: 1 – σ'' (annealing); 2 – σ_2° ; 3 – $\sigma_{0,2}$ (sheet); 4 – $\sigma_{0,2}$ (forging)

Для сравнения с полученными при исследовании параметрами σ'' , σ_2° были взяты результаты измерения величин предела текучести по стандартным методикам (ГОСТ 1497–2023) с тремя видами *исходного состояния* образцов перед закалкой и старением (см. рис. 5: кривые 1 и 2 – холоднокатаные после отжига в $(\alpha + \gamma)$ -области; кривая 3 – холоднокатаный лист; кривая 4 – после горячей прокатки). При анализе *исходного состояния* образцов и условий их получения были установлены различия: *в размере образцов* (\varnothing рабочей части разрывного образца 5 мм, параметр σ'' определялся на образце с диаметром 3,5 мм и длиной 6,8 мм); *способе приложения нагрузки* (параметр σ'' определялся путем ступенчатого сжатия (ГОСТ Р 57173–2016), $\sigma_{0,2}$ – одноосным растяжением); *условиях термообработки* (продолжительность старения холодноотянутых образцов составляла 20 мин., тогда как остальные образцы после 1 ч старения; *уровне значений* предела текучести исследуемой стали и величины параметра σ'').

Однако независимо от исходного состояния и при таком существенном различии в условиях получения сравниваемых величин σ'' и $\sigma_{0,2}$ общим является увеличение этих характеристик в строго определенном температурном интервале. Максимум достигается при температуре старения 450 °С. Общим является также характер изменения зависимостей σ'' и $\sigma_{0,2}$ от температуры старения, определяемый термодинамикой процесса старения в этой стали. Несовпадение в уровне значений величин σ'' и $\sigma_{0,2}$, вероятнее всего, объясняется не специфическими особенностями использованных методик, а названными выше различиями в предварительном исходном состоянии.

Выводы

1. Определены физические параметры микропластической деформации, характеризующие изменение механизмов пластической деформации высокопрочной нержавеющей стали марки 08X15H5Д2Т после упрочняющей обработки (закалки и старения).

Полученные зависимости параметров от температуры старения отражают поэтапное развитие пластической деформации при нагружении до предела текучести и свидетельствуют о процессах распада твердого раствора в интервале температур 350...500 °С.

2. Установлена связь параметра σ'' с пределом текучести $\sigma_{0,2}$ исследуемой стали.

Сравнение параметра σ_2° со значениями предела упругости не проводилось из-за отсутствия в открытой литературе данных для исследуемой стали.

Библиографические ссылки

1. Крюков Л. Т., Еришова М. И. Контроль механических свойств материалов реакторного оборудования по параметрам микропластической деформации // Энергетические системы и комплексы : Труды ГНГТУ имени Р. Е. Алексева Нижегородского государственного технического университета. 2019. № 3. С. 67–72.
2. Еришова М. И., Крюков Л. Т. Использование параметров микропластической деформации для оценки охрупчивания материалов реакторного оборудования // Энергетические системы и комплексы : Труды ГНГТУ имени Р. Е. Алексева Нижегородского государственного технического университета. 2020. № 2. С. 77–84.
3. Бердник О. Б., Царева И. Н., Чегуров М. К. Живучесть материала лопаток турбин при длительных сроках эксплуатации // Вопросы металловедения. 2019. № 1 (97). С. 28–35. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-28-35
4. Gerhard Wilde and Sergiy Divinski (2019) Grain Boundaries and Diffusion Phenomena in Severely Deformed Materials: *Materials Transactions*, vol. 60, no. 7, pp. 1302–1315 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201934>
5. Shanchao Zuo, Danchen Wang, Changqi Yang, Peipei Hu, Ran Bi, Bing Du, Decheng Wang (2023) Stress relaxation behavior of low carbon steel at different temperatures. IOP Publishing Ltd: *Materials Research Express*, vol. 10, no. 10, Res. Express 10105801, DOI: 10.1088/2053-1591/ad019a
6. Parasiz S.A., Kutucu Y.K., Karadag O. (2021) On the utilization of Sachs model in modeling deformation of surface grains for micro/meso scale deformation processes. *J. Manuf. Process.*, vol. 68-A, pp. 1086-1099 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033>
7. О влиянии микроструктурных неоднородностей на прочностные свойства никелевого сплава X65КМВЮБ / О. Б. Бердник, И. Н. Царева, Л. А. Кривина, Ю. П. Тарасенко // Проблемы прочности и пластичности. 2022. Т. 84, № 4. С. 559–569. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-4-559-5699
8. Кириков С. В., Перевезенцев В. Н. О расчете внутренних напряжений от мезодефектов, накапливающихся на границах при пластической деформации твердых тел // Проблемы прочности и пластичности. 2019. Т. 81, № 2. С. 212–221. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-2-212-221
9. Кириков С. В., Пупынин А. С., Свирин Ю. В. Анализ локальных полей упругих напряжений, генерирующих ротационно-сдвиговые мезодефекты вблизи стыков зерен // Проблемы прочности и пластичности. 2021. Т. 83, № 2. С. 235–244. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-2-235-244

10. Пупынин А. С., Кириков С. В., Перевезенцев В. Н. Диффузионное зарождение пор в стыках зерен субкристаллических материалов // Проблемы прочности и пластичности. 2021. Т. 83, № 3. С. 276–284. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-276-28426
11. Влияние пластической деформации на анизотропию упругих свойств и скорости ультразвуковых волн в низкоуглеродистой стали / А. В. Гончар, К. В. Курашкин, О. А. Сергеева, А. А. Соловьёв // Проблемы прочности и пластичности. 2022. Т. 84, № 2. С. 259–271. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-2-259-271
12. Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Narycova M.V. (2020) Evolution of a defect structure during creep tests of ultrafine-grained metals and alloys produced by severe plastic deformation. *Phys. SolidState*, vol. 62, iss. 2, pp. 318-324. DOI: 0.1134/S1063783420020067
13. Павлов В.А. Влияние малых примесей на механизм пластической деформации и разрушение // Вопросы физики прочности. Труды ИФМ АН СССР (Уральский филиал). 1960. Вып. 23. 187 с.
14. Sukhikh A.A., Makhneva T.M., Dement'ev V.B. (2019) Austenite in Nanosteuchured Maraging Steel. *Inorganic Materials: Applied Research (Germany)*, vol. 10, no. 4, pp. 966-973 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1134/S2075113319040415>
15. Makhneva T.M., Dementiev V.B., Makarov S.S. (2020) About Impact Strength and Thermal Properties of Steel Melts. *Solid State Phenomena*, vol. 299 SSP, pp. 430-435 [Электронный ресурс]. URL: [10.4028/www.scientific.net/ssp.299.430](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.299.430)
16. Makhneva T.M., Dementiev V.B. (2022) On the Chemical Heterogeneity of Austenite in Maraging Steel. *Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment Materials Research Proceedings*, no. 2, pp. 224-228 (*Materials Research Forum LLC*) [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-40>
17. Пачурин Г. В. Повышение эксплуатационной стойкости нержавеющей сталей путем технологического упрочнения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 2 (часть 2). С. 28–33.
18. Крюков Л. Т., Пачурин Г. В. Использование характеристик микропластической деформации для определения момента хрупкого разрушения трубных сталей // Фундаментальные исследования. 2015. № 5 (2) [Электронный ресурс]. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38212>
19. Шетулов Д. И., Мильников В. В., Романов А. Д. Исследование параметров микроскопической деформации стали деформируемой сжатием ступенчато возрастающей нагрузкой // Успехи современного естествознания. 2015. № 1 (3). С. 486–488.
20. Шетулов Д. И., Крюков Л. Т., Мясников А. М. Прогнозирование параметров кривой усталости высокопрочных сталей по показателю статической и микропластической деформации образцов // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. Техническая физика. 2015. Т. 4, № 5. С. 381–388.
21. Pupyinin A.S., Kirikov S.V., Perevezentsev V.N. (2021) *pleksey : Trudy GNGTU imeni R. E. Alekseeva Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 2 (129), pp. 77-84 (in Russ.).
22. Berdnik O.B., Tsareva I.N., Chegurov M.K. (2019) [Durability of turbine blade material during long-term operation]. *Voprosy metallovedeniya*, no. 1(97), pp. 28-35. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-97-1-28-35 (in Russ.).
23. Gerhard Wilde and Sergiy Divinski (2019) Grain Boundaries and Diffusion Phenomena in Severely Deformed Materials: *Materials Transactions*, vol. 60, no. 7, pp. 1302-1315 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201934>
24. Shanchao Zuo, Danchen Wang, Changqi Yang, Peipei Hu, Ran Bi, Bing Du, Decheng Wang (2023) Stress relaxation behavior of low carbon steel at different temperatures. IOP Publishing Ltd: *Materials Research Express*, vol. 10, no. 10, Res. Express 10105801, DOI: 10.1088/2053-1591/ad019a
25. Parasz S.A., Kutucu Y.K., Karadag O. (2021) On the utilization of Sachs model in modeling deformation of surface grains for micro/meso scale deformation processes. *J. Manuf. Process.*, vol. 68-A, pp. 1086-1099 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.033>
26. Berdnik O.B., Tsareva I.N., Krivina L.A., Tarasenko Yu.P. (2022) [On the influence of microstructural heterogeneities on the strength properties of the nickel alloy Kh65KMVYuB]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, vol. 84, no. 4, pp. 559-569. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-4-559-569 (in Russ.).
27. Kirikov S.V., Perevezentsev V.N. (2019) [On the Calculation of Internal Stresses from Mesodefected Accumulating at the Boundaries during Plastic Deformation of Solids]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, vol. 81, no. 2, pp. 212-221. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-2-212-221 (in Russ.).
28. Kirikov S.V., Pupyinin A.S., Svirina Yu.V. (2021) [Analysis of the conditions for the existence of stable microcracks in an elastic stress field from a rotational-shear]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, vol. 11, no. 1, pp. 50-54. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-1-50-54 (in Russ.).
29. Pupyinin A.S., Kirikov S.V., Perevezentsev V.N. (2021) [Diffusion-Induced Pore Formation at Grain Joints in Subcrystalline Materials]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, vol. 83, no. 3, pp. 276-284. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-276-28426 (in Russ.).
30. Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Sergeeva O.A., Solovyov A.A. (2022) [Influence of plastic deformation on the anisotropy of elastic properties and the speed of ultrasonic waves in low-carbon steel]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, vol. 84, no. 2, pp. 259-271. DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-2-259-271 (in Russ.).
31. Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Narycova M.V. (2020) Evolution of a defect structure during creep tests of ultrafine-grained metals and alloys produced by severe plastic deformation. *Phys. SolidState*, vol. 62, iss. 2, pp. 318-324. DOI: 0.1134/S1063783420020067
32. Pavlov B.A. (1960) [Influence of small impurities on the mechanism of plastic deformation and fracture]. *Voprosy fiziki prochnosti. Trudy IFM AN SSSR. (Ural'skij filial)*, vol. 23, 187 p. (in Russ.).
33. Sukhikh A.A., Makhneva T.M., Dement'ev V.B. (2019) Austenite in Nanosteuchured Maraging Steel. *Inorganic Materials: Applied Research (Germany)*, vol. 10, no. 4, pp. 966-973 [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.1134/S2075113319040415>
34. Makhneva T.M., Dementiev V.B., Makarov S.S. (2020) About Impact Strength and Thermal Properties of Steel Melts. *Solid State Phenomena*, vol. 299 SSP, pp. 430-435 [Electronic resource]. Available at: [10.4028/www.scientific.net/ssp.299.430](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.299.430)

References

- Kryukov L.T., Erchova M.I. (2019) [Control of Mechanical Properties of Materials of Reactor Equipment on the Parameters of microplastic Deformation]. *Energeticheskie sistemy i komplekсы : Trudy GNGTU imeni R. E. Alekseeva Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 3 (126), pp. 67-72 (in Russ.).
- Erchova M.I., Kryukov L.T. (2020) [Using Parameters of microplastic Deformation to Evaluate Embrittlement of Reactor Equipment Materials]. *Energeticheskie sistemy i kom-*

16. Makhneva T.M., Demytyev V.B. (2022) On the Chemical Heterogeneity of Austenite in Maraging Steel. *Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Materials Research Proceedings*, no. 2, pp. 224-228 (Materials Research Forum LLC) [Electronic resource]. Available at: <https://doi.org/10.21741/9781644901755-40>

17. Pachurin G.V. (2014) [Increasing the operational durability of stainless steels by technological hardening]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, no. 2 (part 2), pp. 28-33 (in Russ.).

18. Kryukov L.T., Pachurin G.V. (2015) [The use of microplastic deformation characteristics to determine the moment of brittle fracture of pipe steels]. *Fundamental'nye issledovaniya*,

no. 5 (2) [Electronic resource]. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38212> (in Russ.).

19. Shetulov D.I., Mylnikov V.V., Romanov A.D. (2015) [Study of parameters of microscopic deformation of steel deformed by compression with stepwise increasing load]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, no. 1(3), pp. 486-488 (in Russ.).

20. Shetulov D.I., Kryukov L.T., Myasnikov A.M. (2015) [Forecasting the parameters of the fatigue curve of high-strength steels based on the indices of static and microplastic deformation of samples]. *Vestnik Nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI. Tekhnicheskaya fizika*, vol. 4, no. 5, pp. 381-388 (in Russ.).

Microflow Parameters of High-Strength Stainless Steel and Their Relationship with Mechanical Properties

V.B. Demytyev, DSc in Engineering, Professor, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

T.M. Makhneva, DSc in Engineering, Associate Professor, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

A.V. Churkin, PhD in Engineering, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

Determination of material mechanical properties is always important and mandatory when assessing the design performance of a structure. Existing methods and standards require correspondence to norms and conditions during preparation, manufacture and testing of samples, making determination of mechanical characteristics labor consuming. Besides, the applied National and industry standards GOSTs, OSTs and methods predetermine the use of metal-intensive samples being as a rule selected with discontinuity violation, and, in the case of a process allowance, the mechanical characteristics imply a degree of certainty. Due to the development of the crystalline lattice defect theory, plastic strain and fracture are described by a physically justified analysis of the processes taking place in the material. A reliable method to determine the microflow parameters on miniature samples under compression has been developed and successfully applied for assessment and prediction of material mechanical properties. The method is based on local stress relaxation of a specimen of the steel under study. The advantage of this method is a certain physical interpretation of the parameters related to changes in material microflow mechanisms. In order to introduce the above-mentioned method into the experimental practice, a comparison of mechanical properties with microflow parameters was carried out using the example of industrial high-strength steel after hardening. The microflow parameters for steel grade 08X15N5D2T and their variation with respect to the aging temperature (T_c) are obtained. The parameters (σ_2 and σ), interpreted as the elastic strength and yield limit, respectively, increase in the range of aging temperatures: the release of a dispersed strengthening epsilon phase (ϵ). When comparing the obtained parameters with the existing characteristics of the steel under study, it was found that there is a correlation between the microflow parameters and the yield limit. The plotted relations $\sigma = f(T_c)$, repeat the pattern of change in the yield limit curve $\sigma_{0.2} = f(T_c)$ regardless of the steel initial state.

Keywords: high-strength stainless steel, elastic strength, yield limit, microflow parameters, heat treatment.

Получено 16.02.2026

Образец цитирования

Дементьев В. Б., Махнева Т. М., Чуркин А. В. Параметры микропластической деформации высокопрочной нержавеющей стали, их связь с механическими свойствами // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 2. С. 39–46. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-2-39-46

For Citation

Demytyev V.B., Makhneva T.M., Churkin A.V. (2026) [Microflow Parameters of High-Strength Stainless Steel and Their Relationship with Mechanical Properties]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 2, pp. 39-46. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-2-39-46 (in Russ.).