

На правах рукописи

Слизов Александр Кузьмич

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛИСТОВОЙ
МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ
С УЧЕТОМ ПРОЯВЛЕНИЯ ТРИП - ЭФФЕКТА**

Специальность 05.16.01

«Металловедение и термическая обработка металлов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник ИМЕТ РАН

Терентьев Владимир Федорович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
заведующий сектором прочности
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

Одесский Павел Дмитриевич

кандидат технических наук, начальник
лаборатории «Конструкционные и
специальные стали» ФГУП «ВИАМ»

Громов Валерий Игоревич

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт черной
металлургии им. И.П.Бардина» (ФГУП «ЦНИИЧЕРМЕТ
им. И. П. Бардина»)

Защита диссертации состоится « _____ » февраля 2019 года в 14 ч 00 мин
на заседании диссертационного совета Д. 002.060.01, созданного на базе Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН),
по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМЕТ РАН, а также на
официальном сайте ИМЕТ РАН <http://www.imet.ac.ru> и на сайте ВАК <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Блинов В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Аустенитно-мартенситная трип-сталь ВНС9-Ш (23Х15Н5АМЗ-Ш), разработанная в ФГУП «ВИАМ» с пределом прочности до 2000 МПа и пластичностью до 35%, используется для производства высокопрочных коррозионностойких листов, крепежных изделий, проволоки и тросов, предназначенных для ответственных деталей авиационной техники. Лучшее сочетание механических свойств эта сталь имеет после холодной пластической деформации, когда структура содержит примерно равное количество наклепанного аустенита и мартенсита деформации. Сталь ВНС9-Ш, в основном, используется в виде тонкого проката или проволоки.

Особенностью стали ВНС9-Ш является то, что при пластической деформации в этой стали проявляется трип-эффект: высокая пластичность, связанная с мартенситным превращением. Многие закономерности изменения механических свойств при деформировании у этой метастабильной аустенитно–мартенситной стали отличаются от механического поведения стабильных аустенитных сталей.

Актуальность проведения исследований механического поведения стали ВНС9-Ш связана с тем, что в настоящее время возникла острая необходимость повысить эксплуатационный ресурс авиационных деталей, изготавливаемых из этой стали и работающих в условиях сложнопеременного циклического нагружения. Кроме того, структурное состояние этой тонколистовой стали и влияние различных факторов на ее механическое поведение недостаточно изучено, что не позволяет в полной мере контролировать качество материала при производстве и в процессе эксплуатации.

Более детальное исследование особенностей поведения стали ВНС9-Ш при механическом деформировании (в условиях статического и циклического нагружения) представляется актуальным, что позволит определить конкретные рекомендации по повышению работоспособности ответственных деталей, производимых из этой стали.

Цель работы - изучить особенности структурного состояния тонколистовой аустенитно-мартенситной стали ВНС9-Ш (23Х15Н5АМЗ–Ш) и ее связь с механическим поведением в условиях статического и циклического деформирования с учетом проявления трип - эффекта, для повышения ресурса эксплуатации ответственных изделий авиационной техники.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- 1) изучить структуру и фазовый состав холоднокатаной тонколистовой ленты из стали ВНС9–Ш в поверхностном слое и по сечению листа и его влияние на изменение уровня механических свойств;
- 2) исследовать особенности стадийности деформации ленты из стали ВНС9–Ш и кинетику мартенситного превращения при статическом растяжении;
- 3) исследовать скоростную зависимость механических свойств и влияние режимов отпуска на механические свойства ленты из стали ВНС9–Ш;
- 4) исследовать особенности механизмов пластической деформации и разрушения, а также основные факторы, определяющие уровень усталостной прочности стали ВНС9–Ш;
- 5) исследовать влияние эксплуатационной наработки материала торсионов вертолетов, изготовленных из ленты стали ВНС9–Ш, на изменение характеристик циклической прочности;
- 6) установить оптимальный фазовый состав стали ВНС9–Ш, который соответствует максимальному уровню комплекса механических свойств и техническим условиям;
- 7) предложить рекомендации по уточнению технических условий и оценки характеристик тонколистового проката из стали ВНС9–Ш и методики оценки фазового состава и механических свойств ленты, предназначенной для изготовления ответственных деталей авиационной техники.

Научная новизна

1. Показано, что тонколистовая холоднокатаная трип - сталь ВНС9–Ш является естественным градиентным композитом с более прочным приповерхностным слоем, содержащим большее количество мартенсита деформации.

2. С использованием комплекса методов исследования (акустическая эмиссия, рентгеновский анализ, электронная микроскопия) установлены особенности пластического деформирования и кинетики изменения фазового состава на различных стадиях статического и циклического деформирования стали ВНС9–Ш.

3. Исследовано влияние скорости деформации в интервале от $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до $25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (от 0,05мм/мин до 30мм/мин) на механические свойства тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9–Ш в условиях статического растяжения с учетом проявления трип-эффекта. Установлен интервал скоростей деформации от $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (от 0,1мм/мин до 3мм/мин), при которых достигаются высокие механические свойства.

4. Изучено влияния температуры отпуска от 125 до 700⁰С на закономерности изменения механических свойств и фазовые превращения в стали ВНС9–Ш. Показано, что повышенный уровень механических свойств сохраняется после нагрева до 400⁰С.

5. Установлены основные факторы, определяющие уровень усталостной прочности стали ВНС9-Ш. Показано, что уровень предела выносливости, в основном, зависит от количества мартенсита деформации в приповерхностных слоях материала. Концентрация напряжений резко снижает характеристики усталостной прочности в результате увеличения количества мартенсита деформации у вершины усталостной трещины.

6. Установлена взаимосвязь между оптимальным фазовым составом стали ВНС9-Ш и повышенными характеристиками механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$ или σ_T , δ , σ_R).

Практическая значимость

1. Разработан ряд рекомендаций для уточнения ТУ14-14126-86 «Лента из коррозионностойкой стали марки 23X15H5AM3-Ш (ВНС9-Ш)», по которым производится оценка химического состава и уровня механических свойств стальной ленты ВНС9-Ш.

2. Предложено в обязательном порядке при производстве этой стали контролировать фазовый состав готовой ленты.

3. На новый способ удаления полимерных покрытий с поверхности торсиона получен патент на изобретение №2556251 «Способ электролитно-плазменного удаления полимерных покрытий с поверхности пластинчатого торсиона несущего винта вертолета».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Структурное состояние холоднокатаной ленты изготовленной из трип-стали ВНС9-Ш и его связь с особенностью поведения этой стали в условиях статического деформирования, обусловленной проявлением трип - эффекта: стадийность деформации, образование мартенсита деформации, механизмы пластической деформации.

2. Влияние скорости деформации и температуры отпуска на изменение механических характеристик стали ВНС9-Ш с учетом фазовых превращений и изменений структуры материала.

3. Особенности механического поведения стали ВНС9-Ш в условиях циклического деформирования с учетом проявления трип-эффекта: структурные изменения, механизмы деформации и разрушения; влияние фазового состава, концентрации напряжений и технологии обработки кромок пластин на усталостные характеристики.

4. Анализ взаимосвязи между фазовым составом стали ВНС9-Ш и комплексом механических свойств в условиях статического и циклического деформирования, а также рекомендации по проведению ряда мер с целью повышения эксплуатационного ресурса ответственных деталей, производимых из этой стали.

Достоверность научных положений, результатов и выводов подтверждается хорошим совпадением экспериментальных данных, полученных различными

современными методами исследования, систематическим характером проведения исследований и обработки результатов, а также согласием полученных результатов с данными других авторов.

Личный вклад автора

Личный вклад соискателя состоит в выполнении основного объема экспериментальных исследований, включая подготовку экспериментальных образцов, проведение экспериментов, обработку результатов исследования, а также в обсуждении результатов исследования и подготовке научных статей совместно с научным руководителем Терентьевым В.Ф.

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на:

Международной научно-технической конференции «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций», 2013 г., Киев, Украина; VII и VIII Евразийской научно – практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2014 и 2016 гг., г. Москва; Международных научных чтениях им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» 2014, 2016 и 2018 гг., г. Москва; VI и VII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», 2015 и 2017 гг., г. Москва; Международной конференции «Инновационные технологии в машиностроении», 2015 г., г. Новополоцк, Беларусь; VII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Тест Мат», 2016 г., г. Москва.

Публикации

Основное содержание диссертационной работы представлено в 16 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы из 96 наименования, изложена на 111 страницах и содержит 70 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, а также указаны ее цели и задачи, отмечена научная новизна, практическая значимость проведенного исследования, и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературных источников по характеристикам статических и усталостных свойств высокопрочных аустенитно-мартенситных трип-

сталей. На основе анализа литературных источников был сделан вывод о необходимости и актуальности дальнейших исследований деформационного поведения высоколегированной трип – стали ВНС9–Ш в условиях статического и циклического деформирования, также сформулированы основные задачи исследований.

Во второй главе содержится описание метода получения, обработки и исследования использованного в работе материала. В качестве объекта исследования использовалась холоднокатаная, тонколистовая (толщиной 0,3 мм), высоколегированная, аустенитно-мартенситная лента из трип-стали 23Х15Н5АМ3-Ш (сталь ВНС9-Ш), которая применяется для изготовления ответственных деталей авиационной техники. Химический состав стали ВНС9-Ш представлен в таблице 1.

Сталь ВНС9-Ш в соответствии с техническими условиями ТУ 14-1-4126-86 «Лента из коррозионностойкой стали марки 23Х15Н5АМ3-Ш (ВНС9-Ш)» должна иметь следующие минимальные механические свойства: предел прочности $\sigma_B \geq 1500$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 1300$ МПа, относительное удлинение $\delta \geq 12\%$. Химический состав стали (вес.%): 0,2-0,25С; 14,5-16Cr; 4,8-5,8Ni; 2,7-3,2Mo; $\leq 1,0$ Mn; $\leq 0,6$ Si; 0,03-0,07N; $\leq 0,01$ S; $\leq 0,015$ P.

Статические механические свойства и характеристики усталости исследованных образцов из стали ВНС9–Ш определялись на электромеханической 10-тонной машине Instron 3380 и универсальной сервогидравлической 10-тонной машине Instron 8801. Испытания на усталость проводились в условиях повторного растяжения с постоянным минимальным напряжением цикла $\sigma_{\min} = 100$ МПа и 500 МПа с частотой нагружения 30-40 Гц. Для испытаний на статическое растяжение и усталость использовались образцы одной и той же геометрии (рис. 1), которые вырезались из листового материала с использованием электроэрозионной резки.

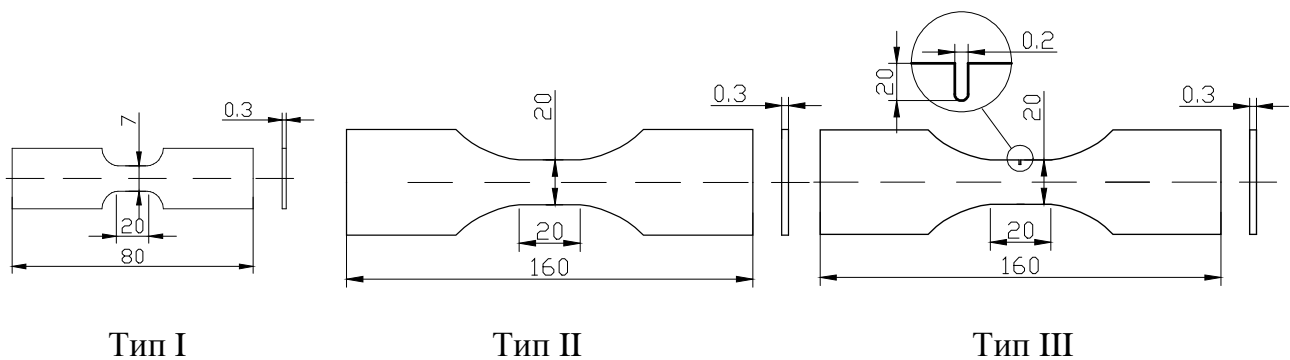


Рис. 1. Образцы для испытания на статическое растяжение и усталость.

Исследование твердости по Виккерсу проводилось на автоматизированном приборе-твердомере Instron Tukon 2500. Для изучения структуры материала использовался световой микроскоп Carl Zeiss Axiovert 40 MAT, сканирующий электронный микроскоп TESCAN VEGA\|SBU и для исследования фольг использовался

просвечивающий электронный микроскоп JEM-200СХ (метод ПЭМ). Для выявления микроструктуры шлифов использовали 4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте, либо раствор царской водки ($3\text{HCl} + 1\text{HNO}_3$) с глицерином. Рентгенофазовый состав (с разбросом данных $\pm 5\%$) определяли на вертикальном рентгеновском дифрактометре «SIMADZU» XRD-6000 в монохроматизированном медном излучении. Исследования характеристик акустической эмиссии (АЭ) проводилось с использованием акустико-эмиссионной диагностической системы СДС1008.

В третьей главе рассмотрены особенности структурного состояния и механического поведения при статическом растяжении тонколистовой стали ВНС9-Ш.

Структура материала.

Холодная прокатка на заключительной операции при изготовлении тонколистовой трип-стали ВНС9-Ш приводит к образованию структуры, состоящей из деформированного аустенита (средний размер зерна 20 мкм) с наличием двойников деформации и деформационного реечного α' -мартенсита (рис. 2 и 3). Чаще всего фазовый состав такого материала состоит из равного содержания аустенита и мартенсита

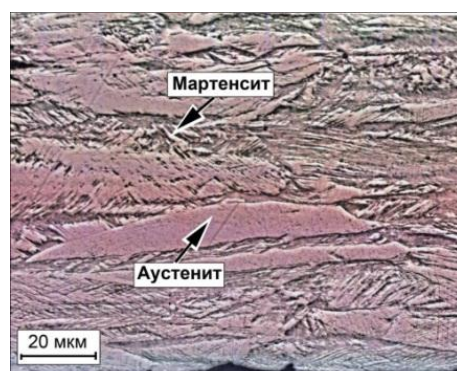


Рис. 2. Макроструктура стали ВНС9-Ш.

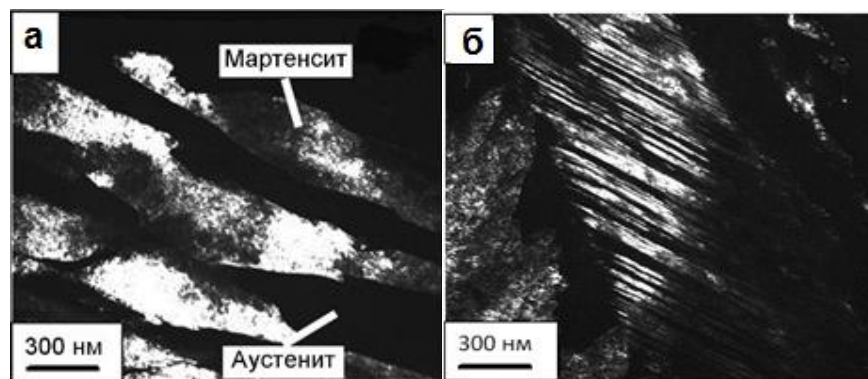


Рис. 3. Дислокационная структура стали ВНС9-Ш:
а - реечный мартенсит, б- двойники деформации в аустените.

Распределение фазового состава по сечению листа из стали ВНС9-Ш.

Исследования с использованием рентгенофазового анализа и последовательного удаления поверхностного слоя показали (рис. 4), что тонколистовая холоднокатаная трип – сталь ВНС9-Ш, является естественным градиентным композитом с более прочным приповерхностным слоем за счет наличия в нем повышенного содержания мартенсита деформации. Этот эффект связан с неравномерностью деформации листа при холодной прокатке. Также с использованием метода асимметричной съемки с параллельным пучком рентгеновских лучей было показано, что в поверхностном слое глубиной меньше 1 мкм формируется однофазная мартенситная структура, связанная с проявлением «размерного эффекта».

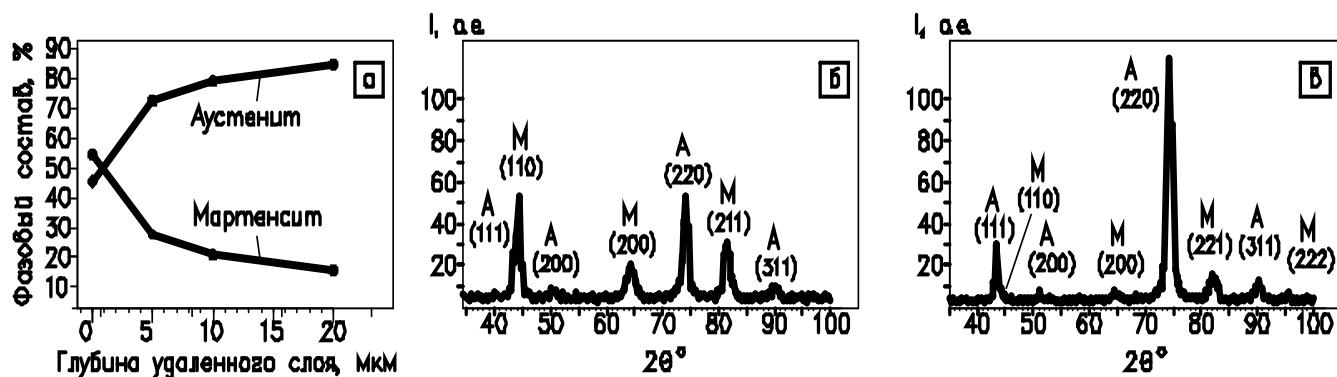


Рис. 4. Фазовый состав ленты из стали ВНС9-Ш:

- (а) фазовый состав поверхности ленты в состоянии поставки и после удаления поверхностного слоя на различную глубину,
- (б) рентгенодифракционный спектр поверхности ленты в исходном состоянии,
- (в) рентгенодифракционный спектр после удаления поверхностного слоя на 20 мкм

На рис. 5 представлена схема изменения фазового состава из стали ВНС9-Ш от поверхностного слоя вглубь материала, с учетом выше приведенных данных по сравливанию поверхностного слоя, и структура исходного материала.

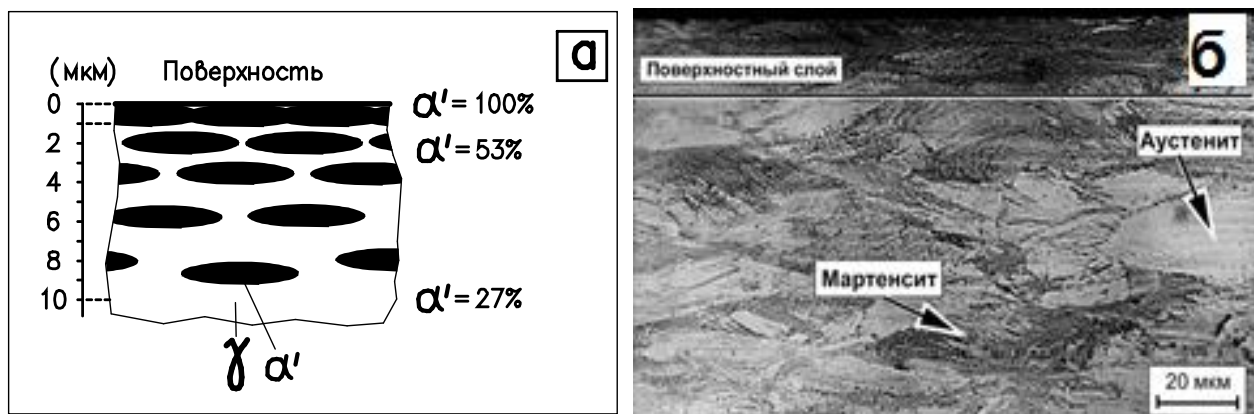


Рис. 5. Распределение фазового состава в тонколистовой трип – стали ВНС9-Ш:
 (а) схема распределения фазового состава на различной глубине от поверхности,
 (б) структура исходного материала.

Особенности механического поведения стали ВНС9-Ш в условиях статического растяжения.

На рис. 6 представлена типичная кривая статического растяжения стали ВНС9-Ш. Кривые статического растяжения стали ВНС9-Ш, в отличие от кривых растяжения высокопрочных углеродистых сталей, имеют ряд характерных особенностей. Во-первых, у трип-стали ВНС9-Ш наблюдается наличие аномально большой стадии микротекучести (деформация до начала возникновения физического предела текучести ϵ_m , которая может составлять до 1,0% пластической деформации). Во-вторых, у нее имеется протяженная площадка текучести ϵ_T (до 8,0%). Деформация на площадке текучести у стали ВНС9-Ш связана не только с процессами сдвигообразования и двойникования по двум пересекающимся системам скольжения, но также с дополнительным образованием мартенсита деформации. В-третьих, у этой стали наблюдается пологая стадия деформационного упрочнения (с низким коэффициентом упрочнения ϵ), аномально высокая пластичность (за счет большого равномерного удлинения) и зубчатый характер кривой растяжения на этой стадии (эффект Портевена–ЛеШателье). Зубчатый характер пластического течения связан с повышенной сопротивляемостью материала локализованному течению (эффект образования микрошеек) и релаксацией внутренних пиковых напряжений при образовании мартенсита деформации. В-четвертых, на заключительной стадии, на кривой статического растяжения не происходит номинального снижения напряжения, связанного с сужением поперечного сечения перед разрушением, а наблюдается интенсивное упрочнение, связанное с образованием мартенсита деформации.

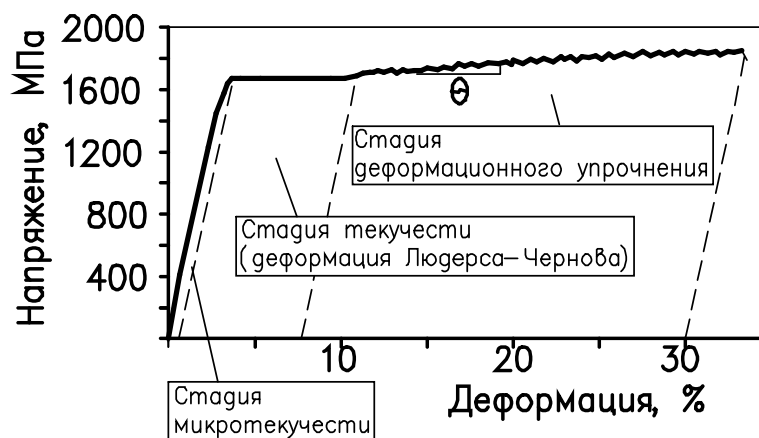


Рис. 6. Кривая статического растяжения стали ВНС9-Ш

В четвертой главе представлены результаты исследования по влиянию скорости деформации и температуры отпуска на закономерности изменения механических свойств тонколистовой стали ВНС9-Ш.

Влияние скорости деформации в интервале от $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до $25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

На рис. 8 представлены кривые статического растяжения образцов, полученные при разной скорости деформации. Видно, что при сильно различающихся скоростях деформации на обеих кривых растяжения наблюдается зуб текучести и площадка текучести. По характеру зубчатого течения видно, что интенсивность образования мартенсита при небольшой скорости деформации значительно выше. При небольшой скорости деформации ($2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) различие между физическим пределом текучести σ_T и условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ составляет всего 35 МПа, при высокой скорости ($3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) это различие в десять раз больше (360 МПа) (рис. 8. а, б).

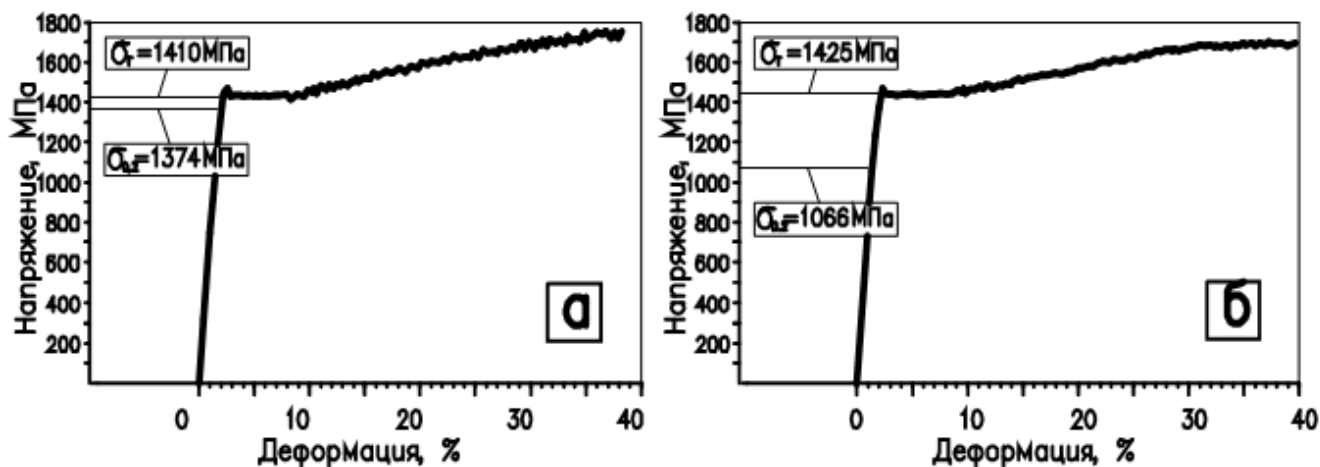


Рис. 8. Кривые статического растяжения стали ВНС9-Ш:
(а) скорость $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и (б) скорость $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Такое существенное различие в значениях этих характеристик связано с тем, что в случае низкой скорости деформирования, деформация (удлинение) на стадии микротекучести у этой стали незначительна, а в случае высокой скорости может достигать 1%. На рис. 9 представлены экспериментальные данные по влиянию скорости деформирования на характеристики механических свойств стали ВНС9-Ш. Повышенные характеристики механических свойств наблюдаются при низких скоростях деформации в интервале от $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (0,05 мм/мин) до $3,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (4 мм/мин). Именно в этом интервале скоростей деформации на кривых растяжения наблюдается интенсивное проявление зубчатого течения, связанного с проявлением трип - эффекта (дополнительного образования мартенсита деформации и увеличения равномерного удлинения). Максимальные значения предела прочности σ_B у образцов серии 1 (~ 1800 МПа) наблюдаются в интервале скоростей деформирования от $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (от 0,05 мм/мин до 0,1 мм/мин), а затем происходит непрерывное снижение уровня значений σ_B до ~ 1520 МПа при скорости деформации $17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (20 мм/мин) (рис. 4.3, а).

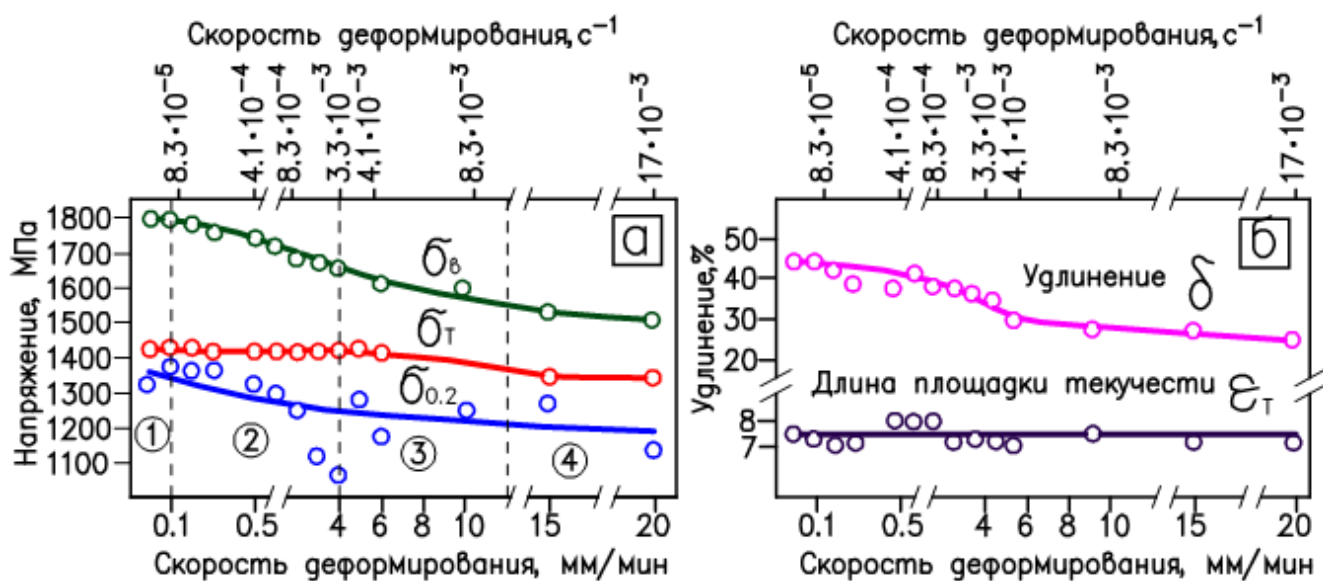


Рис.9. Влияние скорости деформирования на механические свойства образцов из стали ВНС9-III:

(а) прочностные характеристики,

(б) относительное удлинение δ и длина площадки текучести ϵ_T .

Довольно неожиданным является то, что изменение скорости деформации в интервале от $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (0,05 мм/мин) до $8,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (10 мм/мин) практически не влияет на значения физического предела текучести σ_T равного ~ 1440 МПа (рис. 9, а). И лишь затем при скорости $17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ σ_T несколько снизился до уровня ~ 1360 МПа. Удлинение непрерывно снижается от уровня $\sim 44\%$ при скорости $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (0,05 мм/мин) до $\sim 25\%$ - при $17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (20 мм/мин). Снижение пластичности с ростом скорости деформации можно связать, как с деформационным упрочнением материала, так и с меньшим проявлением трип – эффекта. Удлинение на площадке текучести ϵ_T , также как и уровень σ_T , практически не зависят от скорости деформации в исследованном диапазоне скоростей деформации и находится в интервале значений от 7% до 8% (рис. 9, б).

Влияние температуры отпуска на механические свойства тонколистовой аустенитно – мартенситной стали ВНС9-III.

Известно, что отпуск высокопрочных сталей используется чаще всего для улучшения комплекса механических свойств за счет снятия внутренних напряжений, повышения пластичности и ряда других структурных изменений. Вакуумный отпуск в течении 2 ч. с охлаждением с печью проводили в интервале температур от 125 до 620°C . На рис. 10 представлен вид кривых растяжения в зависимости от температуры отпуска. Видно, что после отпуска при 600°C вид кривой растяжения резко меняется: снижаются механические характеристики и практически отсутствует площадка текучести, что связано с обратным фазовым превращением мартенсита в аустенит.

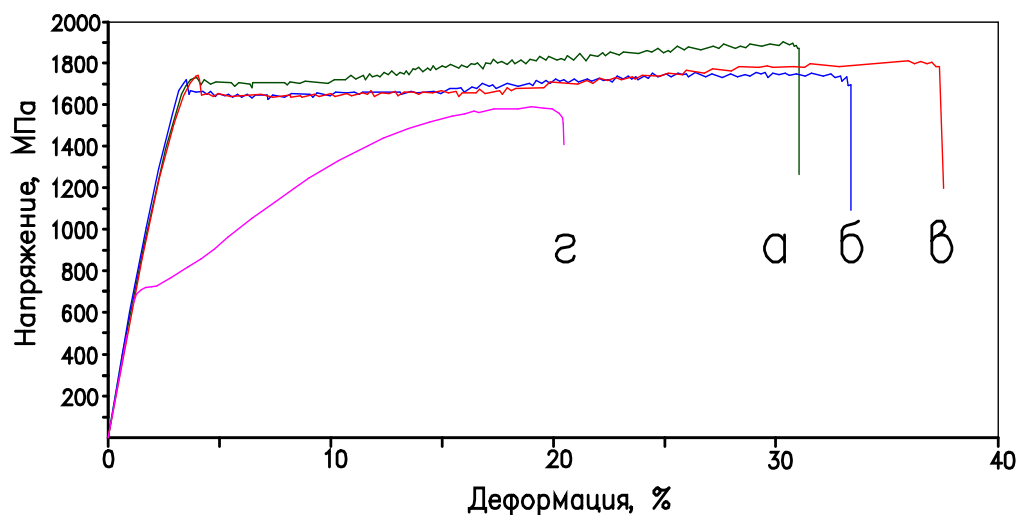


Рис. 10. Изменение вида кривой растяжения в зависимости от температуры отпуска в образцах из трип - стали ВНС9 - III: (а) – без отпуска; (б) – отпуск при 200⁰С; (в) – отпуск при 450⁰С; (г)–отпуск при 600⁰С.

На кривых зависимости изменения механических свойств от температуры отпуска всех исследованных серий образцов можно выделить три характерные области (рис. 11). Область I в интервале температур от комнатной до температуры отпуска 300⁰С, где наблюдается некоторое снижение прочностных характеристик по сравнению с исходным состоянием. Такое снижение прочностных характеристик может быть связано с такими факторами, как перераспределение дислокационной структуры, частичное выделение из твердого раствора мартенсита деформации углерода. Эти факторы также приводят к снижению проявления трип-эффекта в этой стали.

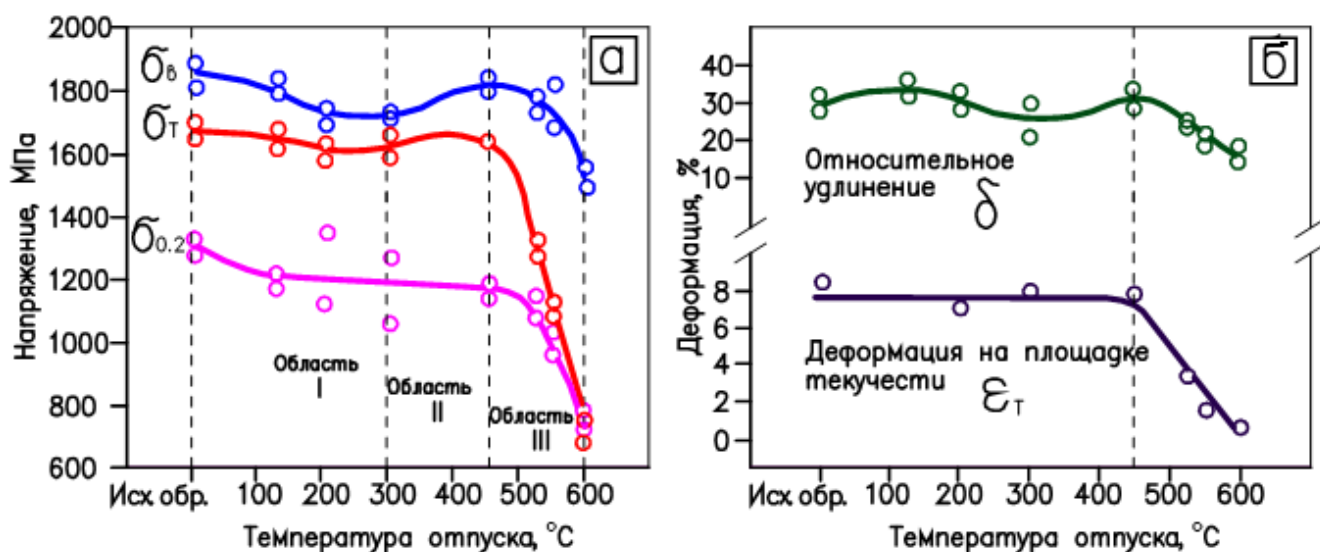


Рис. 11. Изменение механических свойств в зависимости от температуры отпуска в образцах стали ВНС9 – III серии 1: (а) – прочностные характеристики; (б) – относительное удлинение и деформация.

Область II в интервале от 300⁰С до 450⁰С, где наблюдается повышение уровня прочностных характеристик. Повышение прочностных характеристик в этой области может быть связано с упрочнением за счет увеличения количества дисперсных карбидов типа Cr₂₃C₆ на деформационных дефектах α и γ фаз твердого раствора.

В области III резкое снижение всех механических характеристик, по-видимому, в основном, связано с началом обратного превращения мартенсита в аустенит, а также с процессами коагуляции карбидов хрома типа Cr₂₃C₆. В исследованном материале также, начиная с температуры отпуска 450⁰С, происходит снижение значения δ . Величина пластической деформации на площадке текучести вплоть до температуры отпуска 450⁰С остается практически постоянной и, лишь затем, резко снижается (рис. 11, б). Наличие коагуляции карбидов хрома в этой области температур отпуска подтвердилось данными рентгеноструктурного анализа.

В пятой главе рассмотрена усталостная прочность трип-стали ВНС9-Ш в зависимости от различных факторов. Торсионы несущих винтов вертолетов, которые изготавливаются из стали ВНС9-Ш, работают в условиях сложно-напряженного, циклического нагружения, поэтому так важно знать характеристики усталости этой стали.

Особенности поведения стали ВНС9-Ш в условиях циклического деформирования.

На рис. 13 представлена кривая усталости образцов из стали ВНС9-Ш. Видно, что большая часть разрушившихся образцов лежит в области напряжений, соответствующих стадии микротекучести при статическом деформировании, и их долговечность соответствует малоциклового усталости (до долговечности 10⁵ циклов нагружения). Также, у этой стали наблюдается четкий физический предел усталости. Отношение предела усталости к пределу прочности равно ~ 0,5.

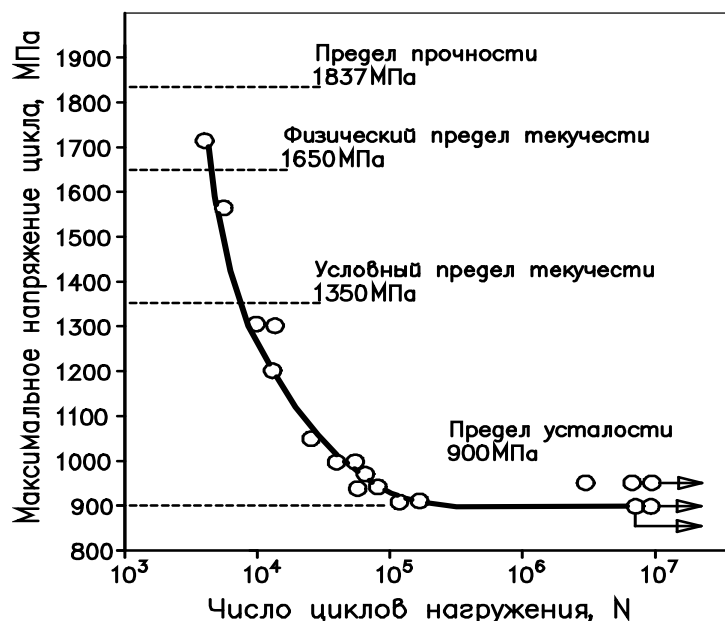


Рис. 13. Кривая усталости образцов из стали ВНС9-Ш

Большой интерес представляет вопрос об особенностях протекания начальных стадий циклического деформирования при напряжениях выше и ниже физического предела текучести в образцах из стали ВНС9-Ш. Еще в 1910 году Л. Бэрстоу показал, что циклическое деформирование в условиях повторного растяжения при напряжениях ниже физического предела текучести приводит к постепенному устранению площадки текучести на кривой растяжения углеродистой стали. Нами было показано, что и у стали ВНС9-Ш при циклическом деформировании ниже статического предела текучести ($\sigma_{\max} = 1300$ МПа) также наблюдается своеобразное проявление деформации на площадке текучести.

Вид полос сдвигообразования при $\sigma_{\max} = 1300$ МПа представлен на рис. 14. Видно, что при $\sigma_{\max} = 1300$ МПа на поверхности образцов наблюдаются полосы сдвигов, в основном, по двум пересекающимся системам скольжения (рис. 14, а- в). На рис. 14, а в обведенном участке наблюдаются образования, похожие на мартенсит деформации. В общем случае при деформации этой стали при комнатной температуре происходят три главных процесса: скольжение, двойникование и образование мартенсита деформации. Мартенсит деформации чаще всего образуется при пересечении двойников. Изогнутые полосы сдвига были обнаружены в зоне перехода от рабочей части образца к более широкой части, которая крепится в захватах испытательной машины (рис. 14, г).

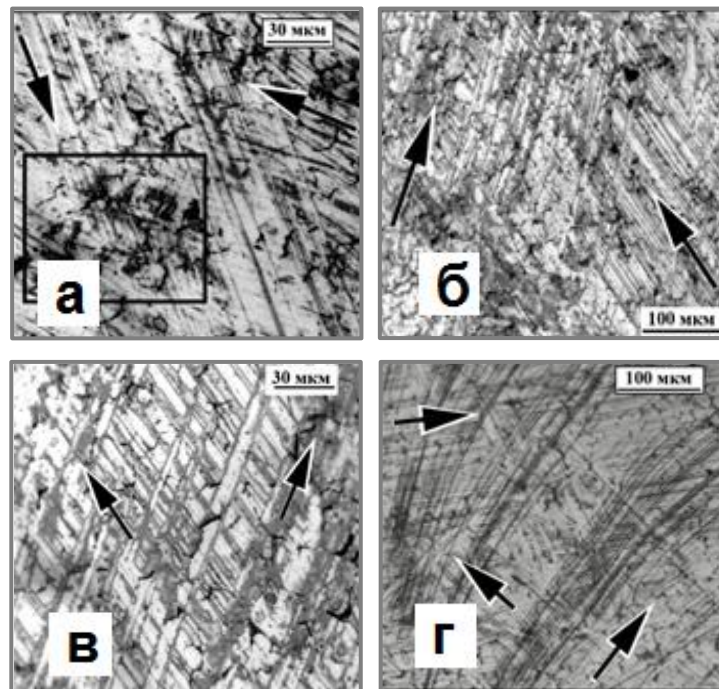


Рис. 14. Структура поверхностного слоя на образцах из стали ВНС9-Ш после испытания на усталость: ($\sigma_{\max} = 1300$ МПа). Стрелками указано направление полос сдвига.

Влияние фазового состава поверхности образцов на усталость тонколистовой трип-стали.

На рис. 15а приведены кривые усталости стали ВНС9-Ш с различным содержанием α' мартенсита деформации. Видно, что предел усталости σ_R стали с содержанием более прочной мартенситной фазы в поверхностном слое 56% на 150 МПа выше (достигает значения 900 МПа), чем у образцов с мартенситом деформации 47%. При этом, точка перегиба кривой усталости при выходе ее на горизонтальный участок смещается в сторону меньшего числа циклов, что характерно для высокопрочных материалов (рис. 15, а).

На рис. 15, б представлена зависимость предела выносливости от количества мартенсита деформации в поверхностном слое. Основная тенденция этой зависимости связана со снижением предела выносливости образцов, у которых содержанием мартенсита больше 60%. В интервале значений мартенсита от 57 до 100% наблюдается линейная зависимость σ_R – α' мартенсит. Но и резкое уменьшение количества мартенсита тоже приводит к снижению σ_R .

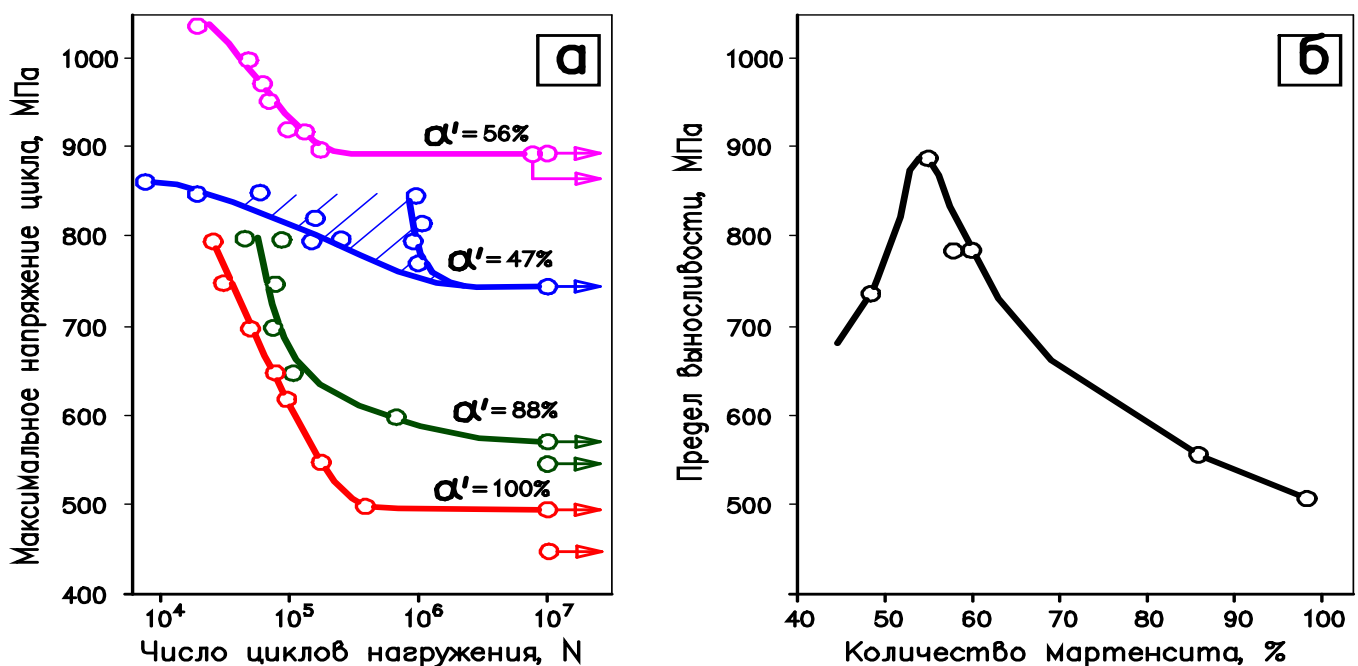


Рис. 15. Зависимость характеристик усталости от фазового состава:

(а) кривые усталости стали ВНС 9-Ш в зависимости от содержания в образцах мартенсита;

(б) зависимость предела выносливости (σ_R) от содержания мартенсита.

Влияние асимметрии цикла нагружения и концентрации напряжений.

Торсионы несущих винтов вертолетов работают с постоянным натягом (минимальная нагрузка) и меняющейся максимальной циклической нагрузкой. Поэтому на образцах из стали ВНС9-Ш с содержанием мартенсита 47 и 100% были проведены

исследования влияния асимметрии цикла нагружения на долговечность до разрушения и уровень предела усталости σ_R . Образцы типа I (рис. 1) испытывались на усталость в условиях повторного растяжения с $\sigma_{\min} = 100$ МПа и $\sigma_{\min} = 500$ МПа. Первый режим был наиболее жестким, поскольку при нем достигался максимальный размах переменной амплитуды нагружения. Второй режим ближе к условиям реальной эксплуатационной нагрузки торсионов.

Результаты испытаний на усталость при разной асимметрии цикла представлены на рис. 16. Предел выносливости σ_R у стали с 47% мартенсита возрастает с 800 МПа при $\sigma_{\min} = 100$ МПа до 1100 МПа при $\sigma_{\min} = 500$ МПа, т.е. увеличился на 300 МПа. А у образцов серии 3 σ_R возрастает на 350 МПа.

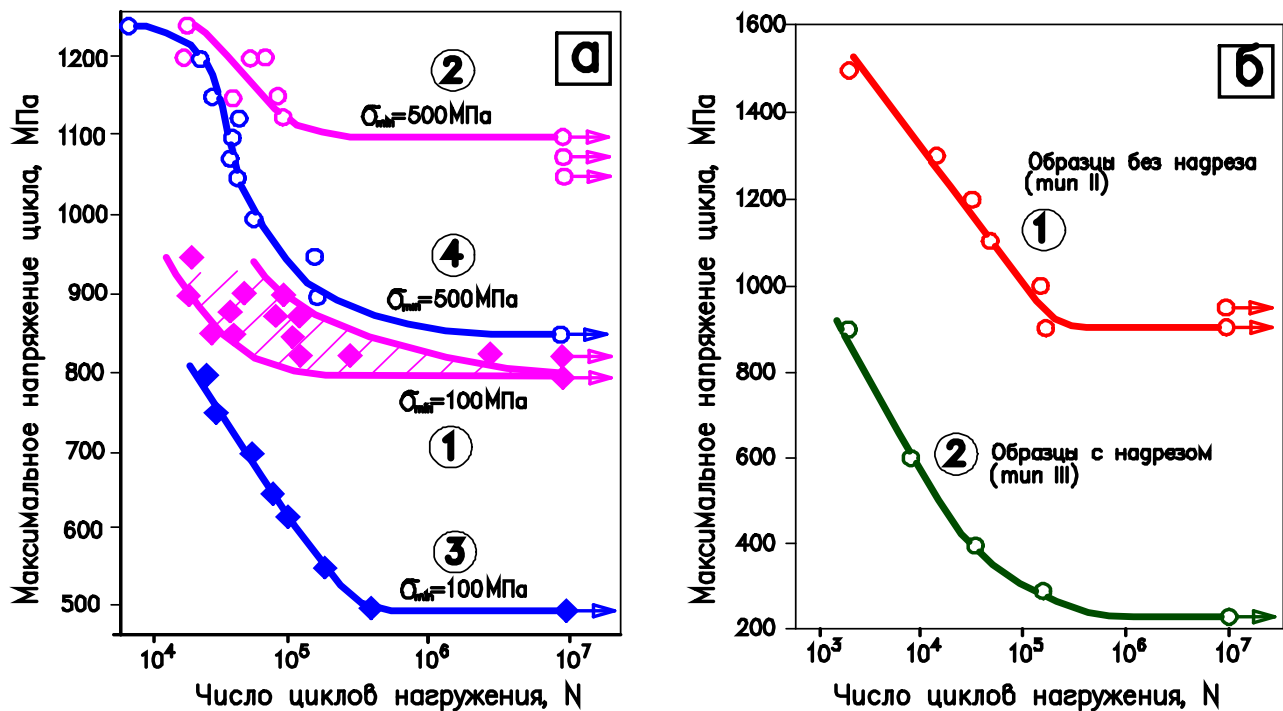


Рис. 16. Влияние асимметрии цикла нагружения (а) и концентрации напряжений (б) на характеристики усталости образцов из стали ВНС 9 – Ш:
 (а) кривые 1, 2 – образцы с 47% содержанием мартенсита;
 кривые 3, 4 образцы с 100% содержанием мартенсита;
 (б) 1- кривая усталости образцов без концентратора напряжений;
 2 – кривая усталости образцов с концентратором напряжений.

Влияние концентрации напряжений на характеристики усталостного разрушения образцов из стали ВНС 9–Ш исследовали на образцах типа II и III (рис. 1). Как следует из рис. 16, (б) концентратор напряжения в виде надреза на образцах типа III приводит к катастрофическому снижению уровня предела выносливости σ_R по сравнению со значениями σ_R образцов без надреза (с 900 МПа до 220 МПа).

Влияние технологии вырезки на механические свойства образцов из тонколистовой стали ВНС9–Ш.

Выше было показано, что концентрация напряжений сильно снижает усталостную прочность листовой стали ВНС9–Ш. При вырезке деталей из этой стали очень важно состояние кромок реза, т.к. там могут находиться дефекты и концентраторы напряжений. Зарождение усталостных трещин происходит именно у кромок реза. На рис. 17, а и б представлены кривые усталости образцов типов I и II, вырезанных электроэрозионной резкой (ЭР) и гидроабразивной резкой (ГР).

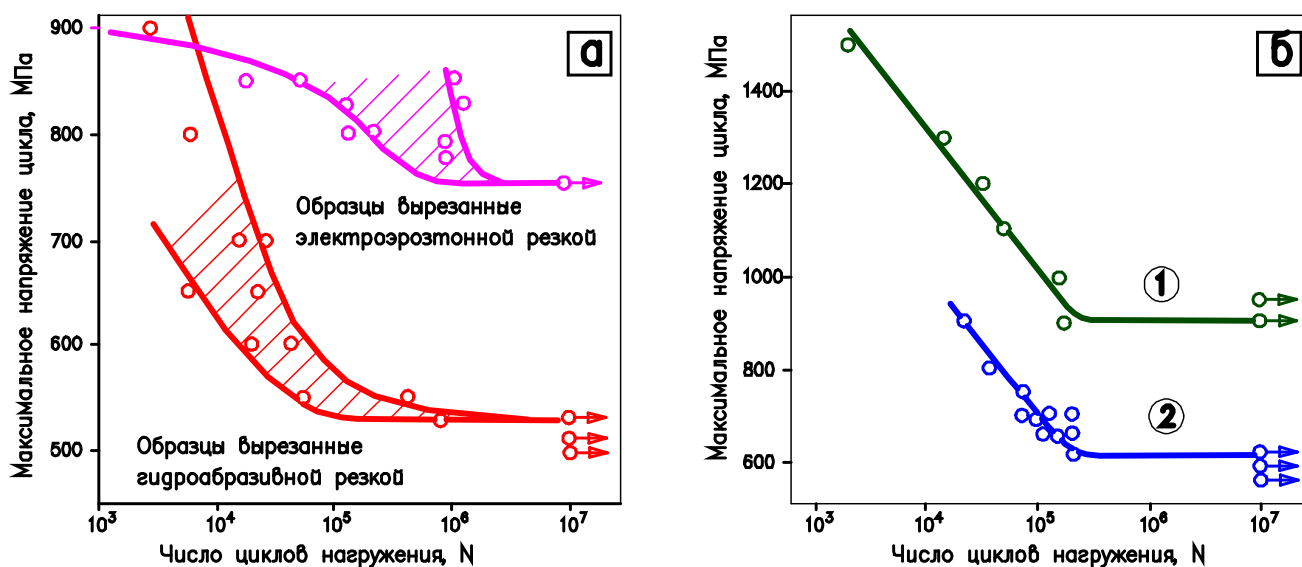


Рис. 17. Кривые усталости образцов из холоднокатаной ленты стали ВНС9–Ш:

(а) кривые усталости образцов типа I:

1 – электроэрозионная резка, 2 – гидроабразивная резка;

(б) кривые усталости образцов типа II:

1 – электроэрозионная резка, 2 – гидроабразивная резка.

Видно, что образцы тип I, вырезанные ЭР, имеют предел выносливости σ_R 750 МПа, что на 220 МПа превышает σ_R образцов, вырезанных ГР (рис. 17, а). Для образцов типа II это различие составляет 300 МПа (рис. 17, б). Поверхность реза при ГР технологии изготовления образцов типа I имеет грубый характер с выступами и впадинами (рис. 18, а). Размер выступов может достигать 20 мкм и для данной высокопрочной стали эти выступы и впадины являются опасными концентраторами напряжений (рис. 18, в). Такой размер неровностей на поверхности реза может являться критическим размером дефекта, при котором с первых циклов нагружения начинается распространение усталостной трещины. У образцов типа I, вырезанных ЭР, таких концентраторов напряжений не наблюдается (рис. 18, б, г).

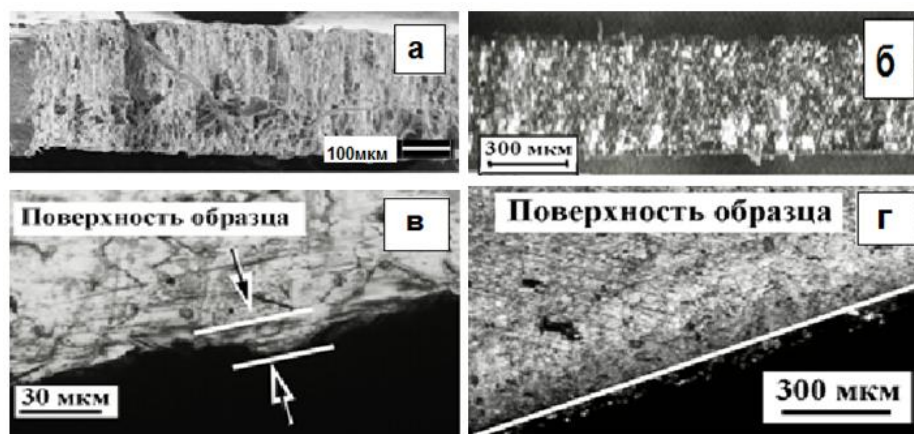


Рис. 18. Поверхность кромок образца, вырезанного различными методами:
 а – вид на боковую поверхность после гидроабразивной резки;
 б – вид на боковую поверхность после электроэрозионной резки;
 в - профиль кромки реза после гидроабразивной резки;
 г - профиль кромки реза после электроэрозионной резки.

В шестой главе проведена оценка оптимального содержания мартенсита деформации в тонколистовой трип-стали ВНС9-Ш, при котором наблюдается лучшее сочетание прочности и пластичности.

Оптимальный фазовый состав ленты из стали ВНС9-Ш.

По условиям заводской приемки у готового листа из стали ВНС9-Ш должны быть следующие механические свойства: предел прочности $\sigma_b \geq 1470$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} \geq 1300$ МПа, относительное удлинение $\delta \geq 12\%$. Однако, при производстве тонколистовой стали ВНС9-Ш она подвергается многочисленным технологическим операциям, и листы, полученные из разных плавов стали ВНС 9-Ш, могут иметь несколько отличающийся химический и фазовый состав, что приводит к некоторому (иногда даже к существенному) различию в уровне механических свойств при статическом и циклическом деформировании. На рис. 19 представлены зависимости механических свойств листовой стали ВНС9-Ш от содержания мартенсита деформации, полученные на основании наших экспериментов и некоторых литературных источников. На этом рисунке пунктирные линии соответствуют минимально необходимым характеристикам механических свойств согласно ТУ на приемку готового листа. Из представленных данных следует, что для получения необходимого уровня предела прочности, соответствующего техническим условиям на поставку ленты, допустимое содержание мартенсита деформации может составлять от 25 до 85% (рис. 19, а).

На рис. 19, (б) на зависимости предела текучести от содержания мартенсита деформации представлены данные по условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$ и по физическому пределу текучести σ_T . Однако, по ГОСТу в случае наличия на кривой растяжения площадки текучести требуется оценивать σ_T , а не $\sigma_{0,2}$, и рекомендуемый интервал содержания мартенсита в стали ВНС9-Ш должен находиться в интервале от 46 до 67%. Таким

образом, одним из критериев получения трип-стали ВНС9-Ш с лучшими механическими свойствами является наличие на кривых статического растяжения площадки текучести. По относительному удлинению δ согласно техническим условиям мартенсита деформации в структуре стали должно быть не менее 12% и такой уровень удлинения наблюдается в диапазоне содержания мартенсита от 0 до 70%. (рис. 19, в).

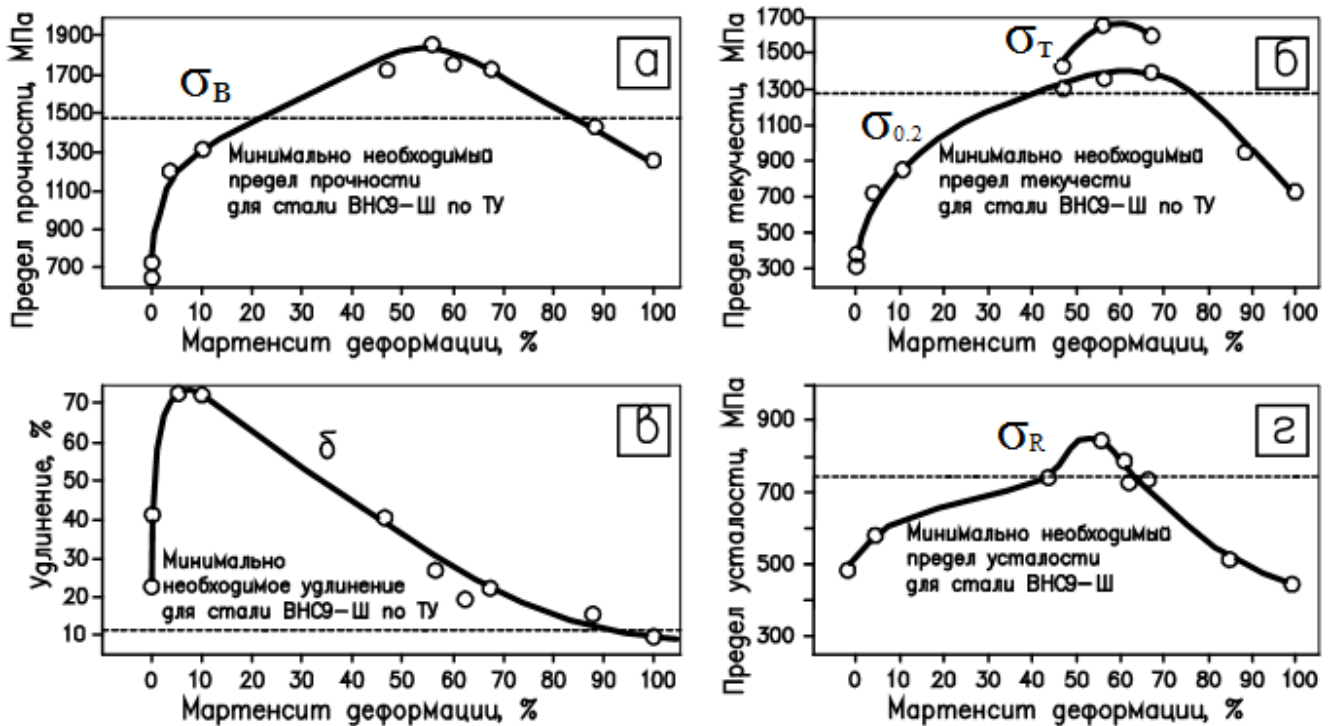


Рис. 19. Зависимости механических характеристик от содержания мартенсита деформации в стали ВНС9-Ш:

- (а) зависимость предела прочности, (б) зависимость предела текучести, (в) зависимость относительного удлинения, (г) зависимость предела усталости

Поскольку листовая сталь ВНС9-Ш толщиной 0,3 мм используется для изготовления ответственных деталей авиационной техники, работающих в условиях циклического нагружения, то особенно важно рассмотреть, как влияет содержание мартенсита в этой стали на усталостную прочность σ_R (рис. 19, г). Максимальные значения σ_R в интервале напряжений от 750 до 900 МПа наблюдаются в интервале содержания мартенсита от 45 до 65%.

Рекомендации по уточнению ТУ 14-1-4126-86 «Лента из коррозионностойкой стали марки 23Х15Н5АМЗ – Ш (ВНС 9-Ш)».

1. В настоящей работе показано, что при оптимальном фазовом составе готовой продукции на кривых статического растяжения имеется физический предел текучести σ_T . В соответствии с ГОСТ в этом случае нужно определять именно σ_T , а не $\sigma_{0.2}$. Поэтому в

новой редакции ТУ14-14126-86 необходимо внести изменения по оценке предела текучести.

1. Кроме того, при сдаче готовой продукции желательнее, кроме определения механических свойств на статическое растяжение, контролировать уровень характеристик усталостной прочности.

2. По ТУ14-14126-86 на заводе-изготовителе не контролируется фазовый состав готовой ленты. Рекомендуется при сдаче готовой продукции ввести обязательный контроль по фазовому анализу с использованием рентгеноструктурного и магнитного анализов.

3. Предлагается готовые торсионы подвергать электроплазменной полировке с целью удаления дефектов поверхности на кромках реза.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. С использованием комплексных методов исследования (акустическая эмиссия, рентгеновский анализ и др.) показано, что листовая холоднокатаная трип-сталь ВНС9-Ш является естественным градиентным композитом с более прочным приповерхностным слоем, содержащим большее количество мартенсита деформации. Также изучены особенности пластического деформирования и кинетики изменения фазового состава на различных стадиях статического и циклического деформирования.

2. Исследовано влияние скорости деформации в интервале от $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до $25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (от 0,05 мм/мин до 30 мм/мин) на механические свойства тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш в условиях статического растяжения с учетом проявления трип-эффекта. Определен диапазон скоростей деформации, при которых высокие механические свойства связаны с проявлением трип-эффекта.

3. Изучено влияния температуры отпуска в интервале температур от 125°C до 700°C на изменение механических свойств и фазовые превращения в стали ВНС9-Ш. Показано, что стабильный уровень механических свойств сохраняется до температур отпуска 400°C .

4. Исследованы особенности механизмов пластической деформации и разрушения, а также основные факторы (асимметрия цикла нагружения, масштабный фактор, фазовый состав и др.), определяющие уровень усталостной прочности стали ВНС9-Ш.

5. Изучена взаимосвязь между фазовым составом стали ВНС9-Ш и комплексом механических свойств ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$ или $\sigma_{\text{т}}$, δ , σ_{R}). Показано, что наилучшие статические и усталостные характеристики соответствуют диапазону, при котором содержание мартенсита деформации в структуре стали находится в пределах от 40% до 60% и при котором наблюдается максимальное проявление трип-эффекта.

6. Разработан ряд рекомендаций для уточнения ТУ14-14126-86 «Лента из коррозионностойкой стали марки 23Х15Н5АМЗМЗ-Ш (ВНС9-Ш)», по которым

производится оценка химического состава и уровня механических свойств стали ВНС9-Ш.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК

1. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирин Д.В.. Исследование усталостных свойств материалов торсионов несущих винтов вертолетов до и после эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2013. №5. С. 18-24
2. Терентьев В.Ф., Бецофен С.Я., Кораблева С.А., Слизов А.К., Ашмарин А.А., Анализ структурных изменений трип-стали ВНС9-Ш при циклическом деформировании // Деформация и разрушение материалов. 2013. №6. С. 16-20
3. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Галкин М.П., Просвирин Д.В., Филиппов Г.А., Гольдберг М.А. Влияние способа вырезки образцов на определяемые механические и усталостные свойства высокопрочной тонколистовой трип-стали ВНС 9-Ш // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 6. С.34-40.
4. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирин Д.В. и др. Влияние скорости деформирования растяжением на механические свойства и фазовый состав трип-стали ВНС9-Ш // Деформация и разрушение материалов. 2014. №10. С. 40-43
5. Сиротинкин В.П., Терентьев В.Ф., Просвирин Д.В., Шамрай В.Ф., Слизов А.К. Рентгенографическое исследование изменения структуры тонколистовой трип-стали ВНС9-Ш после статического растяжения // Металлы. 2015. № 2. С. 15 – 19.
6. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирин Д.В., Сиротинкин В.П., Ашмарин А.А., Елисеев Э.А., Рыбальченко О.В. Влияние фазового состава поверхностного слоя на механические свойства тонколистовой трип-стали 23X15H5AM3-Ш // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 7. С. 30–33.
7. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Сиротинкин В.П., Просвирин Д.В., Кобелева Л.И., Елисеев Э.А., Рыбальченко О.С., Ашмарин А.А. Влияние удаления поверхностного слоя на фазовый состав тонколистовой трип-стали после статического растяжения с разной скоростью деформирования // Металлы. 2016. № 1. 4 С. 40 – 45.
8. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирин Д.В. Проявление трип-эффекта в аустенитно-мартенситной стали ВНС9-Ш при различных скоростях деформации // Деформация и разрушение материалов. 2016. №1. С. 14 – 18.
9. Сиротинкин В.П., Терентьев В.Ф., Слизов А.К. Исследование поверхностных слоев холоднокатаной тонколистовой трип-стали методами рентгеновской дифракции // Деформация и разрушение. 2016. № 5. С. 21 – 26.
10. Елисеев Э.А., Терентьев В.В., Вознесенская Н.М., Слизов А.К., Баикин А.С., Севальнёв Г.С. Влияние скорости деформации на механические свойства тонколистовой трип-стали с высоким содержанием мартенсита // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 7. С. 31 – 33.

11. Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Рощупкин В.В., Слизов А.К., Сиротинкин В.П.. Анализ стадийности деформации трип-стали методом акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 10. С. 35 -40.

12. Терентьев В.Ф., Елисеев Э.А., Матюнин В.М., Слизов А.К., Марченков А.Ю., Сиротинкин В.П., Баикин А.С., Севальнев Г.С. Влияние температуры отпуска на механические свойства и фазовый состав тонколистовой трип-стали ВНС9-Ш // Деформация и разрушение материалов. 2016. №11. С. 30-33

13. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирнин Д.В. Оценка оптимального количества мартенсита деформации для тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ответственного назначения // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 3. С. 33-37.

14. Терентьев В.Ф., Просвирнин Д.В., Слизов А.К., Кобелева Л.И., Марченков А.Ю., Ашмарин А.А., Сиротинкин В.П. Особенности поведения тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш в условиях статического и циклического деформирования // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 8. С.39-47.

15. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирнин Д.В., Ашмарин А.А., Сиротинкин В.П., Рыбальченко О.В., Каплан М.А., Баикин А.С. Влияние удаления поверхностного слоя на характеристики и вид кривых статического растяжения тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 12. С. 33-37.

16. Терентьев В.Ф., Ашмарин А.А., Блинова Е.Н., Титов Д.Д., Блинов В.М., Слизов А.К., Севальнева Т.Г. Исследование зависимости механических свойств и структуры трип-стали ВНС9-Ш от температуры отпуска // Деформация и разрушение материалов. 2018. №6. с. 20-25

Патент

Смыслов А.М., Тамидаров Д.Р., Мингажев А.Д., Смыслова М.К., Селиванов К.С., Михеев С.В., Слизов А.К., Сауткин А.А., Зевиг Г.В., Шевчук И.Ю., Гордеев В.Ю. Способ электролитно-плазменного удаления полимерных покрытий с поверхности пластинчатого торсина несущего винта вертолета. // Патент РФ № 2556251. Опубликовано 10.07.2015 Бюл. № 19.