

Сафонов Михаил Дмитриевич

**Разработка и исследование многослойного стального материала
с высокотемпературной анизотропией теплового расширения**

Специальность 05.16.09 — Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Национальный исследовательский университет).

Научный руководитель: Плохих Андрей Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»,
кафедра «Материаловедение»

Официальные оппоненты: Матросов Юрий Иванович, доктор технических
наук, профессор, Главный научный сотрудник
ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина»

Авдеенко Алексей Михайлович, доктор физико-
математических наук, профессор кафедры ин-
формационных технологий Академии Государ-
ственной Противопожарной Службы МЧС Рос-
сии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО "ВолГТУ").

Защита диссертации состоится « » _____ 2019 г. в час. мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при Московском государ-
ственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г.
Москва, 2-я Бауманская, 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баума-
на и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Непрерывное развитие машиностроения требует создания новых материалов, обладающих уникальным набором физико-механических и эксплуатационных свойств для таких динамичных секторов, как газотурбинное двигателестроение, авиационное, судовое, химическое и металлургическое производства. Интенсивные научные исследования направлены в первую очередь на создание новых материалов, обладающих уникальным комплексом свойств, путем формирования в них специального вида структур, которые в первую очередь, способны расширить возможности конструкторских решений для перспективных образцов новой техники. Такие эффекты наблюдаются в основном в композиционных материалах, что является результатом взаимодействия локальных микроскопических полей упругих напряжений. Изучением теоретических аспектов создания таких материалов занимались такие исследователи, как A. Bensoussan (эффект появления долговременной памяти в композитах), R.F. Almgren (отрицательный коэффициент Пуассона), А.Г. Колпаков (отрицательный ТКЛР в композитах со слоистым строением). Подобные структуры, обладая аномальными деформационными или теплофизическими характеристиками, способны адаптивно реагировать, «вынуждая» материал динамически подстраиваться и регулировать собственный отклик на внешнее воздействие, такое, как температура, внешняя нагрузка, давление, влажность и др.

К настоящему времени промышленностью освоено производство многих видов металлического слоистого проката, которые представляют отдельную группу многослойных материалов конструкционного назначения. Основы создания таких материалов, заложенные в фундаментальных трудах, находят свое развитие в работах современных ученых, таких как Ю.П. Трыков, В.И. Лысак, А.А. Батаев, Л.М. Гуревич, А.Г. Кобелев, В.И. Мали, С.В. Гладковский и ряда других исследователей. Однако, ограниченное количество слоев, которое обычно не превышает десяти, не могут привести к формированию новых качеств, которые проявляются, например, в наноламинатах (М.И. Карпов) либо в слоистых гомогенных материалах, получаемых по ARB-технологии (N. Tsuji).

Поэтому многослойные металлические материалы на основе сталей, с количеством слоев до 2000, получаемые методом горячей пакетной прокатки (А.Г. Колесников, А.И. Плохих), вызывают интерес с точки зрения возможного появления новых, в том числе теоретически предсказанных теплофизических свойств. Учитывая это, актуальными являются исследования, направленные на разработку материалов с анизотропными тепловым расширением, управление которым может оказаться эффективным при проектировании теплонагруженных узлов современных машин и агрегатов, испытывающих высокотемпературный нагрев.

Цель работы — разработка многослойного металлического материала на основе углеродистых и нержавеющей сталей с установлением закономерностей структурообразования при формировании анизотропного теплового расширения.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Установление влияния многослойного строения исследуемых материалов для 100- и 2000-слойных образцов, на температурную зависимость линейного расширения, определенную вдоль направления проката, в плоскости проката и перпендикулярно плоскости проката;
2. Исследование влияния межслойной диффузии легирующих элементов на структуру стальных многослойных материалов и температурную зависимость линейного расширения;
3. Установление влияния повторных нагревов многослойных материалов на температурную зависимость линейного расширения, структурную стабильность и превращения, происходящие на межслойных границах;
4. Определение численных значений ТКЛР(техн.) исследованных многослойных материалов с целью разработки рекомендаций по их практическому использованию.
5. Разработка многослойного металлического материала на основе углеродистых и нержавеющей сталей для использования в теплонагруженных узлах машин и агрегатов.

Научная новизна работы:

1. Впервые обнаружена и исследована резко выраженная анизотропия линейного расширения в многослойных стальных материалах, зависящая от направления проводимого dilatометрического измерения — вдоль направления проката, в плоскости проката либо перпендикулярно плоскости проката.
2. Показано, что межслойная диффузия легирующих элементов в 100- и 2000-слойных образцах, приводит к формированию многослойного материала с новым химическим составом слоев и фазовым строением, при сохранении качественного подобия температурной зависимости относительного удлинения ($\Delta L/L$) и обнаруженной анизотропии.
3. Установлено, что механизм псевдо-инварного эффекта основан на компенсации, происходящей за счет сжатия слоев, претерпевающих $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение при нагреве многослойного материала.

Практическая значимость работы: результаты исследования показали принципиальную возможность получения резко выраженной анизотропии теплового расширения в металлических конструкционных материалах с кубическими кристаллическими решетками (ОЦК и ГЦК) и позволили разработать рекомендации по их созданию.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований по влиянию многослойной структуры на проявление анизотропии линейного расширения, определенную вдоль направления проката, в плоскости проката и перпендикулярно плоскости проката;
2. Результаты влияния межслойной диффузии легирующих элементов на структуру стальных многослойных материалов и температурную зависимость линейного расширения;
3. Экспериментальные численные данные температурных зависимостей ТКЛР исследованных многослойных материалов.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на IV Междисциплинарном научном форуме с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» РАН Москва, 27-30 ноября 2018 г., IX Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (Москва, НИТУ «МИСиС», 2018 г.), V Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Москва, ИМАШ РАН, 2017 г.), VII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, ИМЕТ РАН, 2017 г.), IX Международной научно-инновационной молодежной конференции «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, ТГТУ, 2017 г.), III Всероссийской научно-технической конференции «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники» (Москва, ВИАМ, 2017 г.), XII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (ИМЕТ РАН, 2015 г.), Международных конференциях молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана 2013, 2014, 2017 гг.).

Методы исследований и достоверность результатов. Достоверность результатов обеспечена использованием современного исследовательского оборудования, встроенных программ сбора и обработки данных и комплекса взаимодополняющих методов структурных исследований (сканирующей электронной и оптической микроскопии, рентгеноструктурными методами анализа). Обоснованность теоретических выводов подтверждена экспериментальными данными, полученными лично соискателем.

Личный вклад автора

Вошедшие в диссертацию результаты получены автором под научным руководством кандидата технических наук Андрея Ивановича Плохих. Совместно с научным руководителем автор участвовал в постановке цели и задач исследования.

Диссертантом лично выполнены теплофизические измерения и обработка полученных результатов, проведенные на оборудовании лаборатории «Прочность конструкционных материалов» УДЦ НУК МТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Металлографические исследования структуры многослойных материалов, подготовка образцов для электронной микроскопии была проведена автором с использованием оборудования кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Вошедшие в диссертационную работу результаты и выводы были получены автором лично.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 12 научных работ, в том числе 4 статьи в российских периодических рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 170 наименования. Работа содержит 164 страницы машинописного текста, 89 рисунков и 46 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цели и задачи работы, определены ее научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** дан обзор научных работ, посвященных вопросам формирования ориентированного строения в конструкционных материалах, изготавливаемых традиционными методами формообразования, такими как литье и пластическая деформация. Показано, что получение материалов с аномальными характеристиками теплового расширения связаны в том числе, с созданием слоистых структур. Основным критерием при выборе исходных составляющих многослойных материалов является существенное различие в значениях модуля нормальной упругости E и ТКЛР исходных составляющих многослойной композиции. Однако технологические трудности, связанные с созданием неразрывной связи между слоями, обладающими такими свойствами, видятся весьма значительными. Поэтому актуальной задачей является систематическое исследование многослойных объектов, полученных на основе технологичных материалов, например, сталей.

На основе анализа литературных данных в главе были сформулированы цели и основные задачи настоящего исследования.

Во **второй главе** содержится описание выбора объектов исследования, способа их получения и методов исследования.

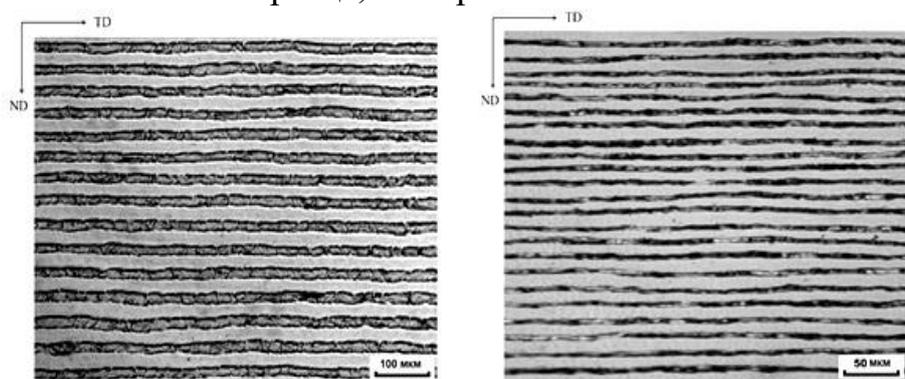
Для получения объектов исследования были выбраны стали различных структурных групп: из которых были составлены следующие композиции: 08X18N10+08кп, 08X18N10+У8, 08X18+08кп и 08X18+У8.

По ранее разработанному экспериментальному технологическому маршруту, включающему мерную резку заготовок из листов, обработку их поверхности, сборку нарезанных листов в пакет, вакуумирование пакета и последующее пластическое деформирование методом горячей пакетной прокатки при температуре 1000 °С, были получены полосовые заготовки шириной 100 мм и толщиной 10 мм. После отбора образцов для исследований, полученные полосы прокатывались до толщины 2 мм, и проходили второй цикл обработки, описанный выше.

Для проведения дилатометрических исследований образцы вырезали в трех направлениях: вдоль направления проката (RD), в плоскости проката (TD) и в направлении, перпендикулярном плоскости проката (ND). Таким образом, объекты исследования имели одинаковые размеры, но разную структуру — после первого цикла это были 100-слойные образцы, которые имели толщину слоя, равную 100 мкм, а после второго — 2000-слойные с толщиной слоя ~5 мкм. Типичная микроструктура многослойных материалов представлена на Рис. 1.

Исследования температурной зависимости линейного расширения проведены на дилатометре DIL-402С «Netzsch» (Германия) с держателем и толкателем из корунда в интервале температур от 20 до 1200 °С при нагреве и охлаждении печи со скоростью 5 К/мин в атмосфере аргона. Температура измерялась плати-

на-платинородиевой термопарой (тип S), расположенной в непосредственной близости от образца, с погрешностью не более 5°C.



а б

Рис. 1. Микроструктура поперечного сечения многослойных металлических материалов первого (а) и второго (б) циклов, толщина образцов 10 мм

использовался селективный кобальтовый фильтр. При анализе применялся полупроводниковый многоканальный линейный детектор LynxEye, обеспечивающий высокую точность получаемых результатов.

Структуру слоев анализировали методом дифракции обратноотраженных электронов (EBSD) с помощью растрового двулучевого электронно-ионного микроскопа Quanta 200 3D FEG, с последующим построением восстановленных карт ориентировок кристаллитов.

Для определения величины и знака напряжений, возникающих при нагреве, было проведено конечно-элементное моделирование с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Dassault Systemes (Франция), лицензия № 200000000050225.

В третьей главе приведены результаты исследований образцов, полученных методом горячей пакетной прокатки после первого (100 слоев) и второго (2000 слоев) технологических циклов изготовления. При проведении дилатометрического анализа установлено (Рис. 2), что температурная зависимость ($\Delta L/L$), полученная при нагреве 100-слойных образцов исследуемых композиций многослойных

Микроструктуру исследовали с помощью металлографического микроскопа Olympus GX-51, с использованием программы анализа изображений SIAMS Photolab.

Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker AXS. Для поглощения K_{β} рентгеновского излучения

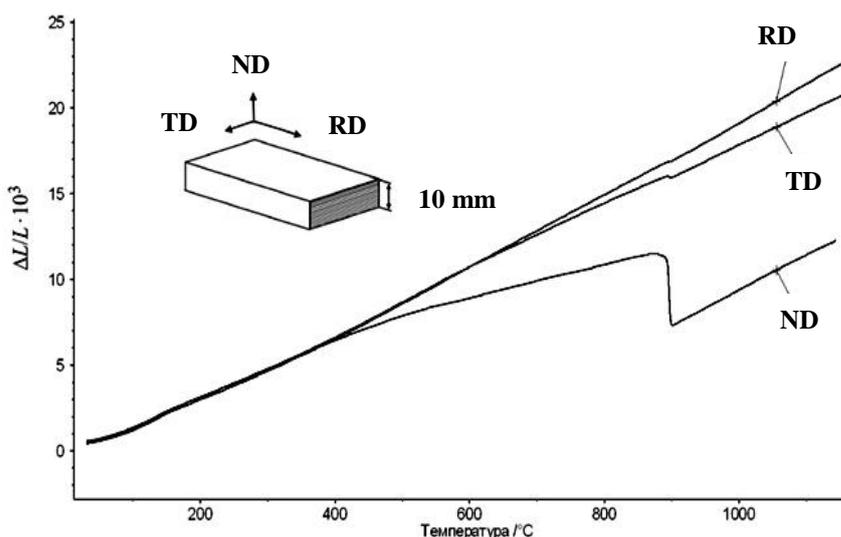


Рис. 2. Температурная зависимость относительного удлинения $\Delta L/L$ образцов многослойного материала в направлениях RD , TD и ND , на примере композиции 08X18H10+08кп (100 слоев)

материалов в направлении, перпендикулярном плоскости проката (ND), имеет отличие по сравнению с температурной зависимостью ($\Delta L/L$) в направлении RD и TD.

Детальный анализ был осуществлен путем дифференцирования первичных экспериментальных данных с определением значений ТКЛР физического (ТКЛР(физ.)), который, являясь более чувствительным к незначительным изменениям, используется в том числе для оценки внутренних напряжений в материалах. На примере образцов первого цикла композиции 08X18H10+08кп показано, что сжатие слоев стали 08кп, которое сопровождается $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращением, в продольном (RD) и поперечном (TD) направлениях, блокируются расширением слоев стали 08X18H10 (Рис. 3).

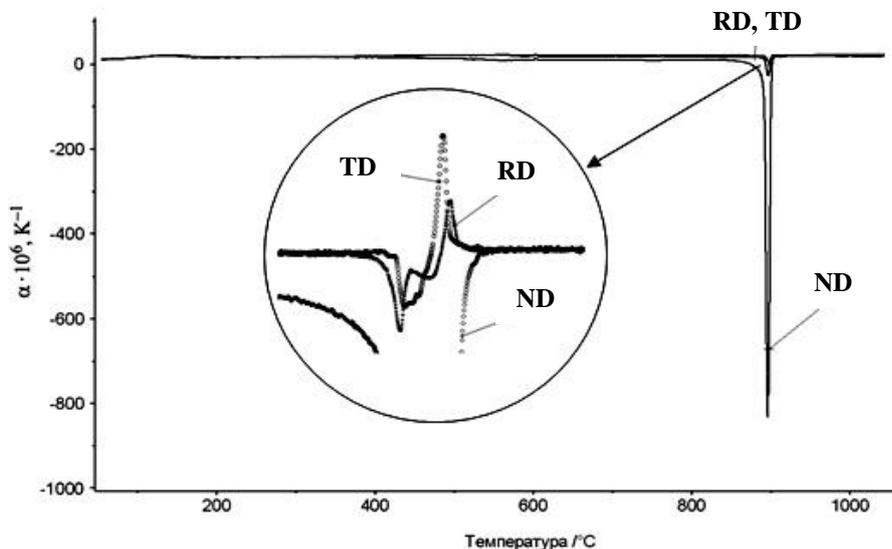


Рис. 3. Зависимость ТКЛР (физ.) при нагреве образцов многослойного материала в направлениях RD, TD и ND, на примере композиции 08X18H10+08кп

Одновременно с этим, расширение стали 08X18H10 в процессе нагрева, способно усиливать эффект сжатия при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения в направлении ND. Установлено, что на дилатограммах нагрева 100-слойных образцов нарушается закономерность возврата к общему тренду теплового расширения после завершения полиморфного превращения, характерная для монометаллических образцов.

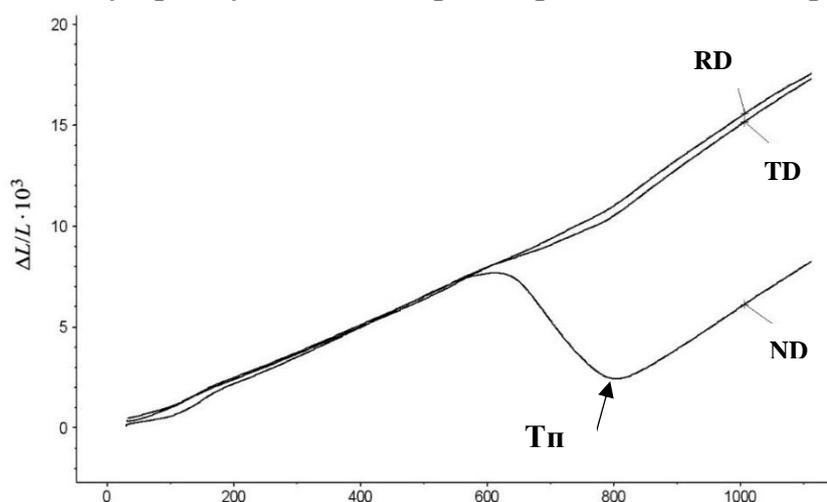


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения при нагреве многослойного материала на примере композиции 08X18H10 +08кп (2000 слоев)

Обнаруженная аномалия усиливается в образцах с количеством слоев 2000, что проявляется в тепловом расширении в направлении ND, происходящим параллельном общему тренду расширения в направлении RD и TD (Рис. 4, ветвь ND).

Расчет ТКЛР(техн.) образцов многослойных материалов исследуемых

композиций показал, что минимальными значениями в направлении *ND* обладают композиции, в состав которых входит сталь 08кп (Таблица 1).

Таблица 1.

ТКЛР(техн.) α , $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, многослойных материалов с количеством слоев 2000, толщина слоя 5 мкм

Направление	Температурный интервал от 20 °С										
	200	300	400	500	600	700	800	$T_{\text{п}}^*$	900	1000	1100
08X18H10+08кп											
<i>RD</i>	11,6	12,0	12,3	12,6	13,2	13,3	13,7	13,9	14,7	15,4	15,8
<i>TD</i>	11,7	11,8	12,3	12,6	13,0	12,7	12,9	12,8	14,1	14,9	15,4
<i>ND</i>	11,9	12,4	13,0	13,5	13,1	7,8	3,1	3,0	4,4	6,1	7,3
08X18+08кп											
<i>RD</i>	11,4	11,8	12,2	12,5	13,1	14,0	14,8	14,6	15,1	15,7	16,1
<i>TD</i>	11,2	11,8	12,4	12,8	13,3	13,7	14,3	13,6	14,1	14,7	15,1
<i>ND</i>	11,0	11,4	12,2	12,6	12,7	12,2	10,9	1,1	1,9	2,1	2,6
08X18H10+У8											
<i>RD</i>	13,5	13,9	14,4	14,9	15,7	16,2	16,7	16,8	17,2	18,3	19,9
<i>TD</i>	13,9	14,5	15,0	15,5	16,0	16,1	16,5	16,5	17,0	18,3	19,9
<i>ND</i>	14,0	14,5	15,2	15,6	14,5	11,8	8,7	6,7	7,0	7,9	8,1
08X18+У8											
<i>RD</i>	13,3	13,9	14,4	14,8	15,0	14,8	15,1	15,2	16,0	16,8	17,4
<i>TD</i>	14,4	14,9	15,5	16,0	16,4	16,9	17,1	17,2	17,8	18,2	18,5
<i>ND</i>	13,9	14,3	15,0	15,5	14,9	12,2	8,5	8,6	9,9	11,1	12,0

* $T_{\text{п}}$ — температура перегиба на дилатограмме, соответствующая минимальному значению ТКЛР в направлении *ND*.

Установлено, что при реализации второго технологического цикла в образцах с количеством слоев 2000, наблюдается снижение температур прямого и обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, что является результатом межслойной диффузии легирующих элементов, которая приводит к формированию слоев с новым химическим составом (см. Таблицу 2).

Таблица 2.

Результаты послойного МРСА образцов с количество слоев 2000 шт.

Элемент	Химический состав, %, по весу							
	08X18H10+08кп		08X18H10+У8		08X18+08кп		08X18+У8	
	Слой, изначально бывшие сталью							
	08X18H10	08кп	08X18H10	У8	08X18	08кп	08X18	У8
Cr	9,51	9,53	16,65	2,60	8,58	8,71	9,15	8,90
Ni	3,29	4,37	5,59	0,51	0,28	0,00	0,30	0,00
Mn	1,16	1,24	1,64	1,01	0,37	0,48	0,74	0,80
Si	0,38	0,26	0,54	0,48	0,36	0,22	0,78	0,89
Fe	85,66	84,60	75,59	95,41	90,41	90,59	89,34	89,41
Итого: 100								

Таким образом температурные зависимости ($\Delta L/L$), полученные при нагреве образцов многослойных материалов с количеством слоев 100 и 2000 качественно подобны и имеют резко выраженную высокотемпературную анизотропию теплового расширения в направлении, перпендикулярном плоскости проката (ND), по сравнению с направлениями RD и TD .

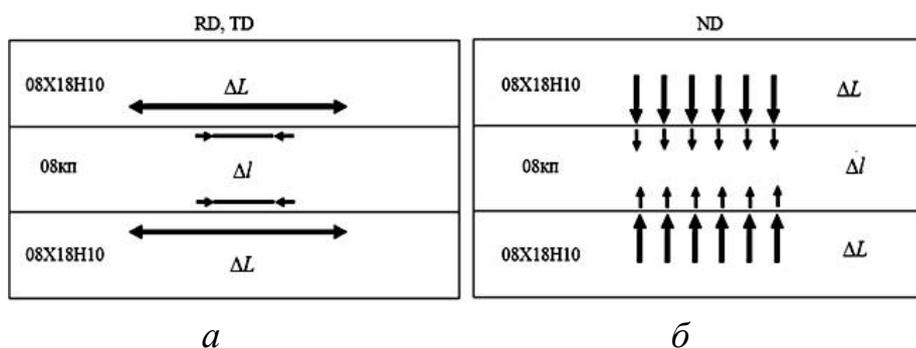


Рис. 5. Схема влияния касательных (а) и нормальных (б) напряжений на примере композиции 08X18H10+08кп.

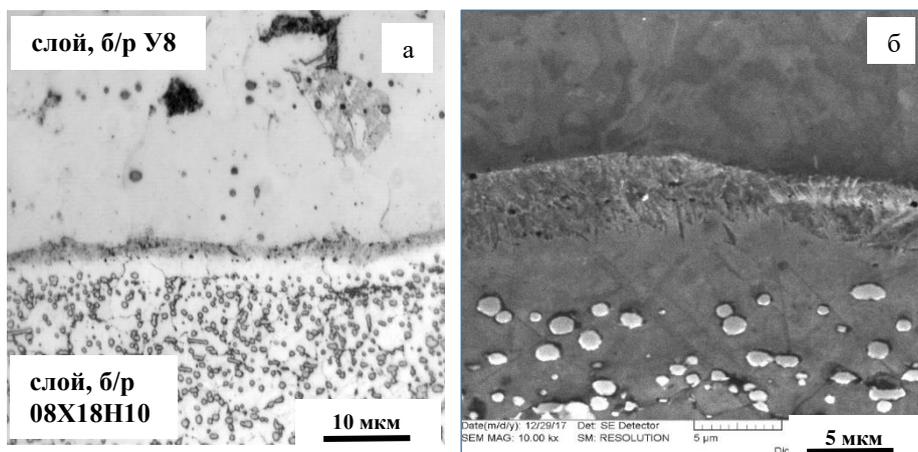
материалов с количеством слоев 100. В направлениях RD и TD наблюдается уменьшение значений ТКЛР многослойного материала вследствие взаимной компенсации термического расширения разнородных слоев (Рис. 5, а). Этот эффект особенно сильно проявляется в интервале $\alpha \rightarrow \gamma$ перехода углеродистых сталей. Так, уменьшение параметров решетки при обратном превращении практически полностью компенсируется расширением стали 08X18H10, что проявляется в отсутствии аномалии на дилатограммах направлений RD и TD . При этом в направлении ND наблюдается усиление эффекта сжатия, связанное с расширением стали 08X18H10 либо 08X18, которое накладывается на сжимающиеся слои, претерпевающие $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение (Рис. 5, б).

С использованием модельных наборных образцов, имитирующих строение многослойных материалов и 100-слойных образцов из стали У8, полученных горячей пакетной прокаткой, дилатометрическим анализом установлено, что эффект усиления сжатия в направлении ND , проявляется в том случае, если слои имеют разницу в значениях ТКЛР (техн.) и между слоями образованна неразрывная связь. В результате математического моделирования на многослойном объекте 08X18H10+08кп с количеством слоев 21, имеющих неразрывная связь между собой, установлено, что знак и величина напряжений изменяется в процессе нагрева в направлении прокатки (RD) несколько раз. В нормальном направлении (ND), значительное по величине однонаправленное сжимающее действие, наблюдается также при температурах близких к интервалу $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, что соответствует экспериментальным дилатограммам исследуемой композиции.

На основании результатов моделирования, сделан вывод о верности предложенной гипотезы о ведущей роли напряжений, действующих в слоях в направлениях RD , TD и ND , возникающих в процессе нагрева 100-слойных образцов.

В четвертой главе для объяснения полученного результата сделано предположение о ведущей роли межслойных напряжений, возникающих при нагреве, вследствие разницы значений ТКЛР сопрягающихся слоев в образцах многослойных

Показано также, что напряжения, возникающие в слоях многослойного материала, превышают значения 150 МПа в продольном и 25 МПа в нормальном направлении, и способны оказать существенное влияние на структурные превращения в многослойном материале при нагреве.



Анализ микроструктуры 100-слойных (толщина слоя 100 мкм) горячекатаных образцов на примере композиции 08X18N10 +U8 показал, что на границе слоев, бывших ранее (б/р) сталью У8 и 08X18N10, присутствуют прослойки, в которых отсутствует карбидная фаза (Рис. б). Учитывая подробный

Рис. 6. Межслойная граница композиции 08X18N10+У8:

а – оптическое и *б* - электронное изображение

характер горячей деформации, не превышающей 10% за проход, которая сопровождалась охлаждением в валках и печным нагревом до 1000°C, можно предположить, что прослойка, образовалась в результате релаксации циклически возникающих напряжений на межслойной границе.

Для проверки этого предположения 100-слойные образцы исследуемой композиции подвергли дополнительному нагреву до температуры 1200°C, заведомо превышающую температуру растворения карбидов хрома. В результате установлено

уменьшение толщины слоев, бывшие ранее сталью У8, со среднего значения 100 мкм, в исходном горячекатаном состоянии, до 85–90 мкм. Для исключения влияния процессов, обусловленных растворением карбидной фазы, были

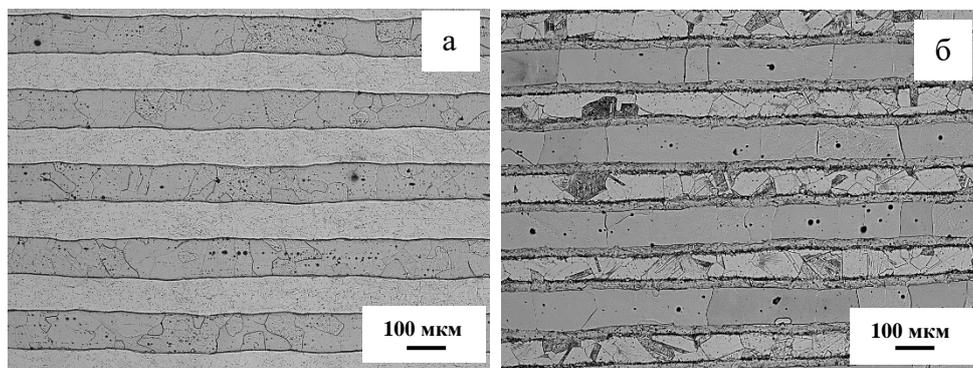


Рис. 7. Микроструктура композиции 08X18N10+08кп в исходном состоянии (а) и после трехкратного (б) нагрева до температуры 1200°C

проведены аналогичные нагревы на образцах композиции 08X18N10+08кп (Рис. 7), которые также привели к образованию на межслойной границе прослойки, граница которой мигрирует вглубь слоя 08кп, что особенно заметно при 3-кратном нагреве. Таким образом установлено, что в 100-слойных образцах многослойных материалов при высокотемпературных нагревах (1200°C) наблюдает-

ся структурные изменения, связанные с релаксацией межслойных напряжений. Механизм этой релаксации может проходить путем протекания микропластической деформации в слое, обладающем высокой пластичностью, что при нагреве приводит к последующей рекристаллизации, которая происходит путем миграции межслойной границы. Однако, учитывая высокую диффузионную подвижность легирующих элементов, нельзя исключить и смешанный характер превращения на межслойной границе.

Установлено, что в результате межслойной диффузии легирующих элементов в 2000-слойных образцах, наблюдается изменение химического состава слоев (Таблица 2). Результатом этой диффузии может быть, как изменение, так и сохранение фазового состава материала. На примере композиций 08X18+08кп и 08X18Н10+У8, показано, что фазовый состав в целом сохраняется. Так образцы композиции 08X18+08кп содержат α - и γ -фазу с содержанием 96% и 4%, а композиция 08X18Н10+У8 - 68% и 32%, соответственно.

Формирование близких по химическому составу слоев, приводит к уменьшению межслойных напряжений по сравнению с образцами первого цикла, в следствие достижения равных значений ТКЛР(техн). Это говорит о том, что механизм возникновения аномалии в образцах, имеющих в своей структуре 2000 слоев с толщиной единичного слоя 5 мкм, может быть связан не только с действием межслойных напряжений.

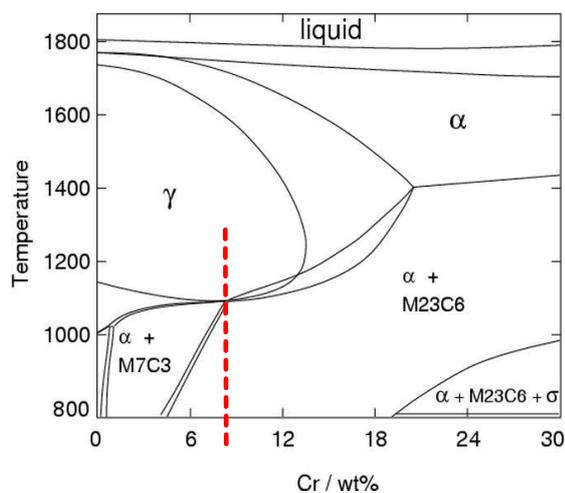


Рис. 8. Схема политермического разреза диаграммы Fe-Cr-C, для концентрации углерода 0,1 %.

Результаты рентгеновского анализа поперечных сечений образцов композиции 08X18+08кп показали, что на дифрактограммах наблюдается перераспределение интенсивностей рентгеновских максимумов, что свидетельствует о формировании текстуры в α -фазе с преимущественной ориентировкой в направлении $\langle 110 \rangle$. Учитывая также, что диффузия завершается формированием близких по составу слоев, с концентрацией хрома равной 9% можно видеть, что эта концентрация соответствует интервалу на диаграмме Fe-Cr-C в котором отсутствует двухфазная область (Рис. 8), что является причиной образованию α -фазы в таких сплавах по бездиффузионному

сдвиговому механизму. С другой стороны известно, что в образцах многослойных материалов с количеством слоев 2000, за счет локализации пластического течения и динамической рекристаллизации в пределах каждого слоя, формируется «бамбуковая» структура. В этом случае толщина зерен становится равной толщине слоя, в результате чего многослойный образец в произвольном поперечном сечении, представляет собой пачку из 2000 монокристаллов, расположенных друг над другом. Учитывая это, причина анизотропии теплового расширения в направлении ND может быть объяснена одновременным влиянием трех факторов: наличием «бамбуковой» структуры, наличием текстуры α -фазы, и со-

гласованным, однонаправленным сдвиговым $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходом в каждом слое, имеющем состав близкий к сплаву Fe-9%Cr.

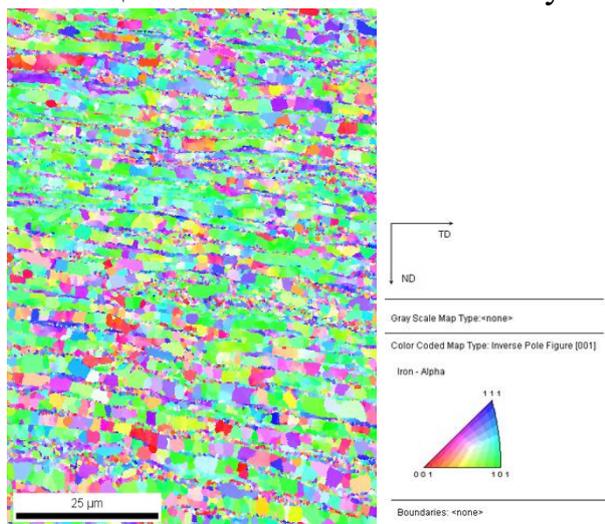


Рис.9. EBSD-карты структуры образца композиции 08X18H10+У8, количество слоев 2000, толщина слоя 5 мкм.

расширения в многослойных материалах. Исследования, проведенные с целью оценки воспроизводимости обнаруженного эффекта, показали, что нагревы (3–5 циклов) до температуры, не превышающей температуру растворения карбидной фазы, приводят к полной повторяемости эффекта. Превышение температуры растворения карбидов хрома резко снижает эффект, что, как было показано ранее, связано с нарушением многослойного строения материала из-за протекания рекристаллизации.

Учитывая локальность эффекта, ограниченного толщиной многослойного листа предложено техническое решение, которое усиливает его действие без геометрического масштабирования в рабочем направлении. Таким решением является операция раскатки плоских кольцевых заготовок, вырезанных из многослойного проката, в заготовку типа «втулка» (Рис. 10).

Последовательность операций состоит в предварительной вырезке многослойной кольцевой заготовки из листа (1), горячей деформации кольца (2) для получения полой конусной заготовки (3) и последующей горячей раскатки конусной заготовки в заготовку типа «втулка» (4). В результате проведенных операций осуществляется «разворот» направления ND и ее совмещение с рабочей поверхностью.

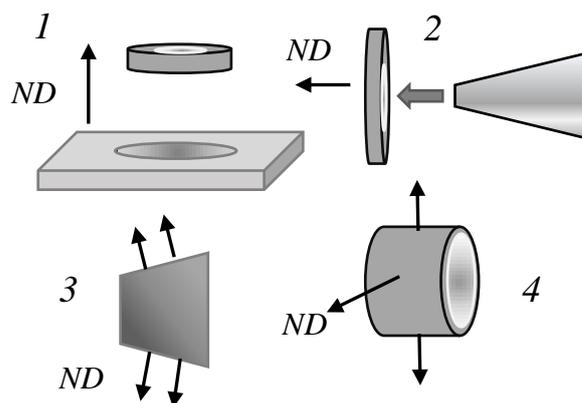


Рис. 10. Схема изготовления детали типа «втулка» из плоского кольца

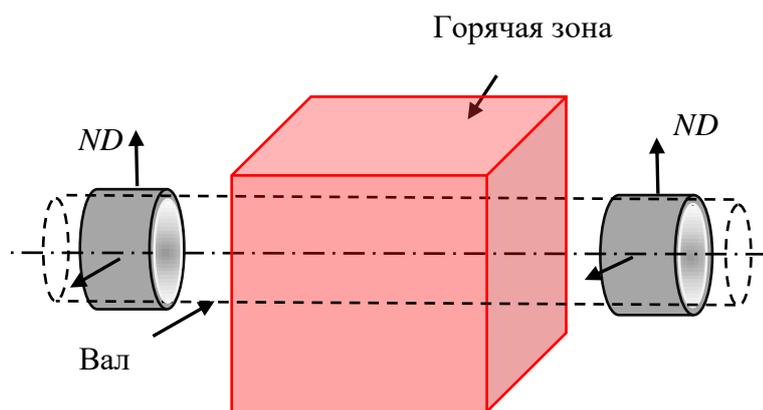


Рис.11. Схема компенсации радиального теплового расширения вала в опорах скольжения втулками из многослойного материала.

за счет уменьшения толщины ее стенок, что приведет к увеличению теплового зазора между сопрягаемыми деталями и как следствие, уменьшению возникающих напряжений.

Для изготовления таких втулок можно рекомендовать многослойный материал, разработанный в данной работе на основе композиции 08X18H10+У8. Как было показано, сжатие в направлении ND наблюдается, начиная от температуры $\sim 600^{\circ}\text{C}$. Имея в своем составе слои со значительной объемной долей карбидной фазы Me_{23}C_6 , с температурой растворения около 1050°C , можно ожидать частичную компенсацию температурного расширения вала, в интервале от 600 до 1000°C .

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволили выявить общие закономерности структурообразования в многослойных металлических материалах и определить его влияния на температурную зависимость линейного расширения. Установлено:

1) Влияние многослойного строения стальной композитной заготовки на температурную зависимость линейного расширения при нагреве многослойного материала, которое выражается в проявлении анизотропии:

— в 100-слойных образцах (толщина слоя 100 мкм) из-за сжатия, происходящего при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении в слоях углеродсодержащей стали (08кп либо У8) в направлении RD и TD, которое компенсируется расширением слоев стали 08X18H10 либо стали 08X18. Одновременно с этим тепловое расширение при нагреве легированной стали (08X18H10 либо 08X18), способно усиливать эффект сжатия при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении в слоях углеродсодержащей стали в направлении ND.

— в однофазных образцах с количеством слоев 2000 (толщина слоя 5 мкм) в направлении ND, обусловленное влиянием трех факторов: «бамбуковой» структуры сформированной в каждом слое материала, текстуры α -фазы, а также,

Таким образом предлагается получать конструктивные элементы, способные частично компенсировать тепловое расширение в радиальном направлении тех деталей, которые испытывают высокотемпературный нагрев в горячих зонах, например валов, имеющих опоры в более холодной зоне конструкции (Рис. 11). При достижении температуры $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения в многослойном материале, будет наблюдаться дополнительное увеличение внутреннего диаметра втулки

предположительно, согласованного и однонаправленного сдвигового $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения в слоях с составом Fe-9%Cr.

— в двухфазных ($\alpha + \gamma$) образцах с количеством слоев 2000 (толщина слоя 5 мкм) в направлении ND, обусловленное влиянием напряжений, возникших при формировании новой структуры со значительной концентрационной неоднородностью легирующих элементов в слоях и как следствие, разных значений ТКЛР.

2) Горячая деформация при пакетной прокатке сопровождается межслойной диффузией легирующих элементов, которая приводит к формированию слоев с новым химическим составом. В ряде многослойных материалов наблюдается снижение действия межслойных напряжений, которое фиксируется, как уменьшение ТКЛР(физ.) в образцах с количеством слоев 2000, что является следствием формирования слоев с одинаковым химическим составом;

3) При циклических нагревах, не превышающих температуру прокатки (1000°C) наблюдается повторяемость обнаруженной аномалии в многослойных образцах исследуемых составов. При циклических высокотемпературных нагревах (1200°C) в 100-слойных образцах наблюдается рекристаллизации, которая протекает путем миграции межслойных границ в направлении наиболее пластичного слоя. Высокотемпературный нагрев до 1200°C , в образцах с количеством слоев 2000, приводит к нарушению многослойного строения и снижению эффекта от обнаруженной аномалии расширения.

4) Определены численные значения ТКЛР(техн.) исследованных композиции, при этом установлено, что минимальные значения имеют составы со сталью 08кп. Так, в образцах с количеством слоев 2000 шт. композиции 08X18+08кп, в интервале температур от 850 до 1100°C , в направлении ND зафиксированы значения от 1,1 до $2,6 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, что соответствует значениям инварных сплавов, для которых ТКЛР(техн.) был определен в интервале температур от -100 до $+100^\circ\text{C}$.

5) Разработанный многослойный материал, полученный на основе сталей 08X18N10 и У8, может быть рекомендован для использования в теплонагруженных узлах машин и агрегатов, с целью частичной компенсации теплового расширения сопрягающихся деталей в интервале температур от 650 до 1000°C .

Основные положения диссертации отражены в указанных ниже работах

Статьи в периодических рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ

1. Плохих А.И., Колесников А.Г., Сафонов М.Д. Высокотемпературный псевдоинварный эффект в многослойных материалах на основе сталей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19. № 2. С.7-20. (0,87 п.л. / 0,39 п.л.).
2. Сафонов М.Д. Исследование инварной аномалии в многослойных материалах на основе сталей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 6 (78). С.1–15. (0,94 п.л.).

3. *Плохих А.И., Сафонов М.Д., Колесников А.Г., Карпухин С.Д.* Механизм релаксации межслойных напряжений в многослойных стальных материалах // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С.26–32. (0,44 п.л. / 0,15 п.л.).
4. Effect of Diffusion Processes During Pack Rolling on Multilayer Material Stability / *M.D. Safonov [et al.]* // *Metallurgist* 2018. Vol. 62, Issue 5-6. P. 432–439 (0,5 п.л. / 0,1 п.л.; Scopus)

Остальные публикации

5. *Kabantseva V.E., Safonov M.D., Plokhikh A.I.* The high-temperature pseudo-invar effect in multilayer steel materials // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 525 (2019), 012038. doi:10.1088/1757-899X/525/1/012038 (0,31 п.л. / 0,1 п.л.; Scopus)
6. Исследование влияния диффузии легирующих элементов на фазовый состав многослойного стального материала / *Сафонов М.Д.* [и др.] // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2019. № 28. С 13 - 18. (0,37 п.л. / 0,1 п.л.).
7. *Плохих А.И., Сафонов М.Д.* Анизотропия температурного коэффициента линейного расширения в многослойном стальном материале // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды V Международной научной конференции*. М.: ИМАШ РАН, 2017. С. 214–216. (0,19 п.л. / 0,1 п.л.).
8. *Плохих А.И., Сафонов М.Д., Колесников А.Г.* Псевдо-инварный эффект в многослойных материалах на основе сталей // *Сборник трудов VII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов»*. М.: ИМЕТ РАН, 2017. С. 424–426. (0,19 п.л. / 0,1 п.л.).
9. *Плохих А.И., Сафонов М.Д., Колесников А.Г.* Механизм псевдо-инварного эффекта в многослойных материалах на основе сталей // *Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции*. М.: ВИАМ, 2017. С. 11. (0,69 п.л. / 0,23 п.л.).
10. *Сафонов М.Д.* Исследование температурной зависимости теплового расширения многослойных материалов на основе сталей // *Будущее машиностроения России. Сборник трудов 10-й международной конференции молодых ученых (с международным участием)*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 132-135 (0,25 п.л.).
11. *Сафонов М.Д.* Исследование условий проявления структурной наследственности в хромистых сталях мартенситного класса // *Сборник материалов XII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»*. М.: ИМЕТ РАН, 2015. С. 100 – 102 (0,13 п.л.).
12. *Плохих А.И., Сафонов М.Д.* Исследование структурных превращений хромистых сталей в составе композиций многослойных материалов // *Техника и технология: новые перспективы развития*. 2014. № XV. С. 73–77. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.).