

Влияние циклической термической обработки на структуру слоистого композиционного материала из стали марок 08кп и 08X18H10

© А.А. Худнев¹, А.И. Плохих², А.Н. Большакова¹, Р.М. Дворецков¹

¹ФГУП «ВИАМ», Москва, 105005, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлено исследование влияния пятикратных циклических нагревов до температуры 1000 °С и двукратных циклических нагревов до 1100 °С на структуру слоистого композиционного материала, состоящего из 100 чередующихся слоев стали марок 08кп и 08X18H10 (толщина одного слоя ~22 мкм). В результате диффузии никеля и хрома в ходе циклической термической обработки произошли изменение толщины слоев и образование прослойки со структурой, отличной от структуры соседних слоев. Нагрев до 1100 °С привел также к частичному нарушению слоистого строения этого материала. Установлено, что реальный диффузионный путь легирующих элементов за время термической обработки значительно превышает расчетный, а атомы хрома перераспределяются между слоями материала гораздо активнее атомов никеля.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал, сталь марки 08кп, сталь марки 08X18H10, диффузия, циклическая термическая обработка, микроструктура, горячая пакетная прокатка

Введение. Слоистые композиционные материалы отличаются высокими прочностными, упругими и пластическими характеристиками [1–6]. Применение многослойных материалов позволяет уменьшить массу изделий и значительно увеличить ресурс работы деталей и конструкций, работающих в условиях тяжелых температурно-силовых нагрузок, а также сэкономить относительно дорогостоящие легирующие элементы [7–9]. Наиболее эффективной и экономичной по сравнению с другими технологиями производства подобных композитов является прокатка [10].

Использование сталей в качестве основы для изготовления слоистых композиционных материалов привлекательно вследствие широкой доступности и разнообразия сортамента данного сплава. Слоистые композиционные материалы на основе сталей целесообразно применять для изготовления баллонов высокого давления, броневых материалов, упругих чувствительных элементов машин и агрегатов, тяговых органов длинноходовых глубинных насосных установок для добычи нефти из скважин, распиловочного инструмента и т. д. [11, 12].

Более ранние исследования [13] показали, что для получения многослойной ламинарной структуры в материале, созданном на основе одного металла, необходимо, чтобы композиция была составлена

из сплавов, имеющих различное кристаллическое строение (например, ГЦК- и ОЦК-решетки). Поэтому знание особенностей перераспределения легирующих элементов между слоями сталей представляет интерес, ведь именно химический состав слоев определяет строение стали и свойства материала, а также отвечает за сохранение слоистого строения. Следует отметить, что при полном перераспределении легирующих элементов материал станет монолитным, и это должно привести к потере у него уникальных свойств.

Вместе с тем в ряде опубликованных работ показано влияние воздействия высоких температур на особенности формирования структуры слоистых композиционных материалов [14–16]. В этих трудах рассмотрено, как во всех исследуемых материалах в результате диффузии легирующих элементов, которая вызвана нагревом слоистых композитов, образовались новые слои, отличающиеся по химическому составу и структуре от исходных, что приводило к изменению физико-механических свойств этих материалов.

Подобные исследования, вероятно, имеет смысл провести и со слоистыми композиционными материалами на основе сталей, потому что под действием высокотемпературного нагрева легирующие элементы из одной стали должны диффундировать в слои второй стали [17]. Вследствие этого могут сформироваться новые промежуточные слои с иной структурой, чем у исходных слоев, что должно повлиять на свойства композиционного материала. Управлять процессом перераспределения легирующих элементов в слоистом материале можно путем регулирования определенных параметров, прежде всего температурой нагрева и продолжительностью выдержки образцов.

Цель настоящей работы — исследование воздействия циклических высокотемпературных нагревов на структуру слоистых композиционных материалов, изготовленных из углеродистой стали марки 08кп и нержавеющей стали марки 08X18H10. Данная композиция является модельной, так как она не относится ни к одной из разработанных ранее схем выбора исходных составляющих стальных слоистых композиционных материалов [18], ведь и сталь марки 08кп, и сталь марки 08X18H10 при температуре прокатки имеют гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку аустенита. В связи с этим ее можно считать предназначенной для исследования процессов диффузии в стальных многослойных материалах. Стабильность структуры здесь напрямую зависит от скорости диффузии никеля и хрома из стали марки 08X18H10 в сталь марки 08кп.

Материал и методики исследования. Для экспериментов был выбран стальной многослойный материал, состоящий из 100 чередующихся слоев стали марок 08кп и 08X18H10 — по 50 слоев каждой из них. В табл. 1 приведено фактическое содержание легирующих

элементов в этих марках стали, определенное с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Данные табл. 1 показывают, что химический состав двух соседних слоев исследуемой композиции различается в первую очередь содержанием никеля (приблизительно на 8 %) и хрома (приблизительно на 18 %).

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Марка сплавляемой стали	Содержание легирующих элементов, % (мас.)											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	V	S	P	Cu
										Не более		
08X18H10	0,02	0,52	1,74	18,60	8,15	0,30	0,05	0,05	0,08	0,002	0,036	0,3
08кп**	0,08	0,03	0,37	0,1	0,3	–	–	–	–	0,035	0,03	0,3

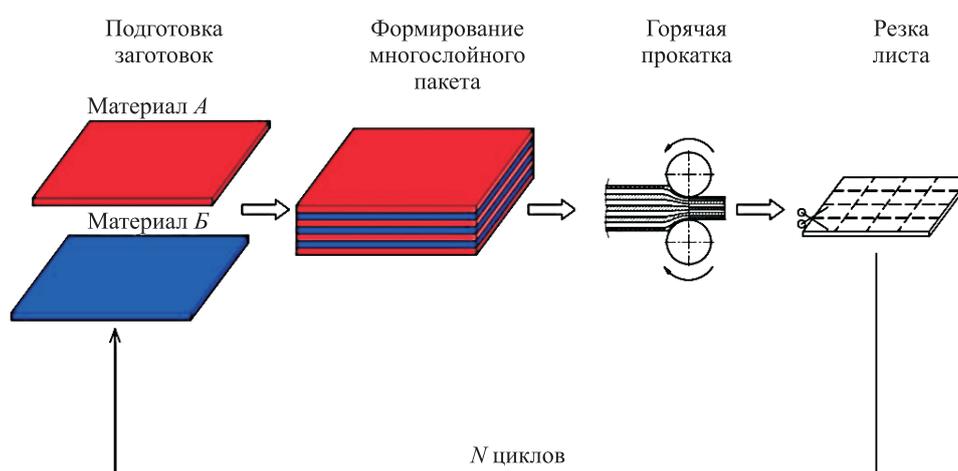


Рис. 1. Схема технологического процесса получения многослойных материалов [19]

Схема технологического процесса получения многослойных материалов изображена на рис. 1 [19]. Перед прокаткой проводили мерную резку заготовок из листов, обработку их поверхности, сборку нарезанных листов в пакет, вакуумирование пакета, нагрев в печи до 1000 °С и последующее пластическое деформирование методом горячей прокатки. В результате реализации одного полного технологического цикла был получен слоистый материал толщиной 2,2 мм (толщина одного слоя ~22 мкм).

Из полученных путем одного полного технологического цикла листов были вырезаны в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, образцы размерами 10 × 10 × 2,2 мм, предназначенные для циклического отжига и последующего исследования структуры.

Термоциклирование выполняли путем многократного нагрева образцов в камерной печи, которые затем выдерживали в течение 15 мин и охлаждали на воздухе. Одну группу образцов нагревали до 1000 °С, другую — до 1100 °С. Были проведены пять циклов нагрева до 1000 °С, выдержки и охлаждения, и два цикла нагрева до 1100 °С.

Микроструктуру прокатанных образцов исследовали методами металлографического анализа на микроскопе Olympus GX51 с различным увеличением. Травление осуществляли 20%-ным водным раствором персульфата аммония.

Для более детального изучения всех слоев композиции шлифы также исследовали методом сканирующей электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi SU8010 с использованием приставки энергодисперсионного спектрометра. Изображения получали с помощью детектирования отраженных электронов, несущих информацию о распределении электронной плотности.

Для определения средней толщины каждого слоя материала выполняли не менее 15 измерений на различных участках фотографий микроструктур, полученных на оптическом микроскопе.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Микроструктура композиционного материала образца, изготовленного из стали марок 08кп и 08Х18Н10, в исходном состоянии после прокатки представлена на рис. 2, а, в. Материал состоит из чередующихся светлых слоев стали марки 08Х18Н10 и темных слоев стали марки 08кп. Средняя толщина слоев стали 08кп составляет 23,6 мкм, а слоев стали 08Х18Н10 — 20,8 мкм. Сталь марки 08Х18Н10 имеет структуру аустенита [20], а марки 08кп — практически полностью феррита.

На фотографии, приведенной на рис. 2, в, можно заметить наличие тонкой (толщиной ~2 мкм) переходной зоны между слоями. Эта прослойка образовалась в результате диффузии легирующих элементов, в первую очередь, никеля и хрома, из стали марки 08Х18Н10 в сталь марки 08кп.

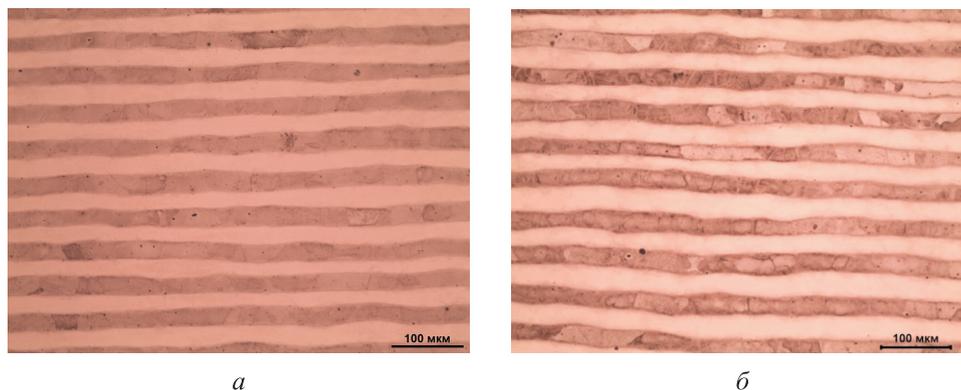


Рис. 2 (начало). Микроструктура слоев из стали марок 08кп и 08Х18Н10 в исходном состоянии (а и в) и после пяти циклов нагрева до 1000 °С (б и г): увеличение а и б — $\times 200$, в и г — $\times 1000$

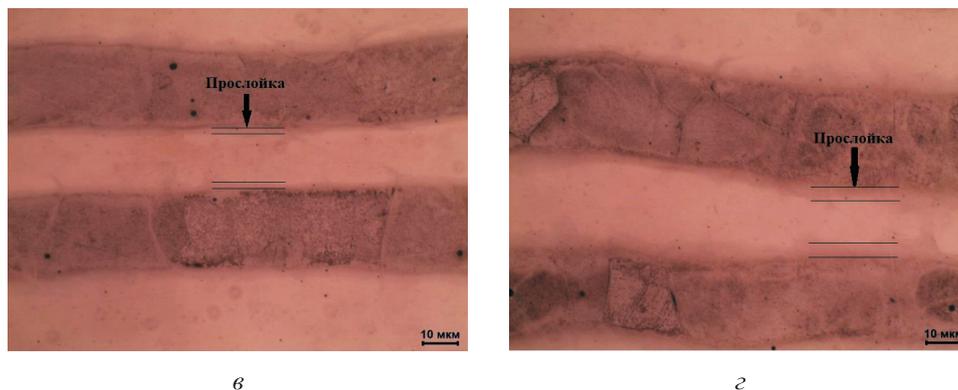


Рис. 2 (окончание). Микроструктура слоев из стали марок 08кп и 08Х18Н10 в исходном состоянии (а и б) и после пяти циклов нагрева до 1000 °С (б и з): увеличение а и б — ×200, в и з — ×1000

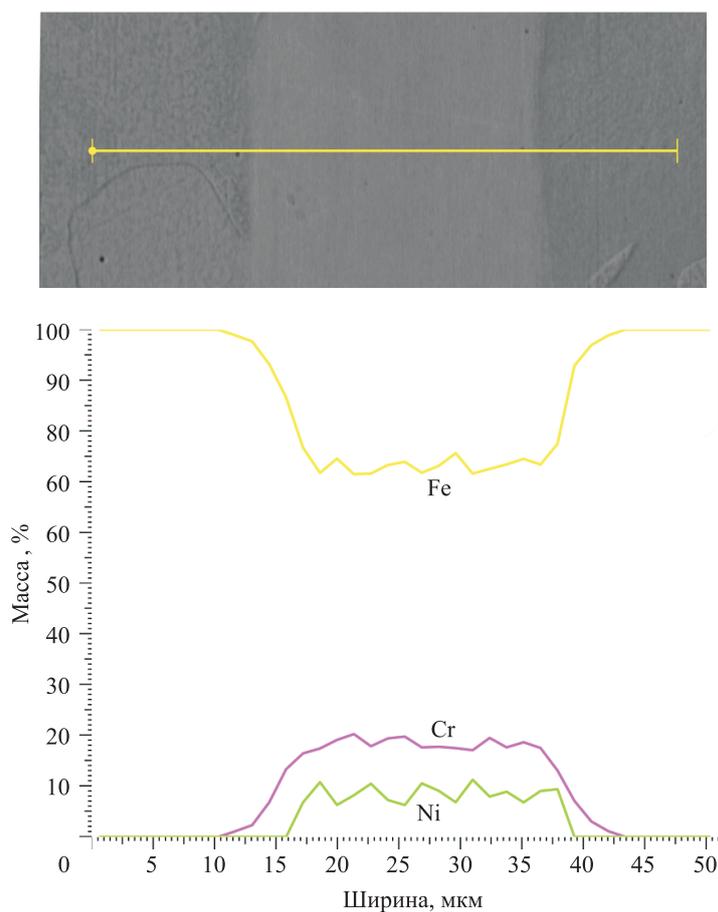


Рис. 3. Распределение никеля, хрома и железа в многослойном образце из стали марок 08кп и 08Х18Н10 в исходном состоянии после прокатки

Распределение основных химических элементов в слоях материала, полученное путем энергодисперсионного анализа, представлено на рис. 3. Ширина зоны с ненулевым содержанием никеля равна 23 мкм, а с ненулевым содержанием хрома — 36 мкм. Это свидетельствует о том, что атомы хрома успели продиффундировать на расстояние примерно 7–8 мкм, а атомы никеля переместились всего на 1–2 мкм.

К основным изменениям, произошедшим в композиционном материале из стали марок 08кп и 08Х18Н10 после проведения пятикратного нагрева до температуры 1000 °С, выдержки в течение 15 мин и охлаждения на воздухе (рис. 2, б, в), можно отнести изменение толщины слоев материала: в среднем толщина слоев из стали марки 08кп уменьшилась на 4–5 мкм (до 19,2 мкм), а толщина слоев из стали марки 08Х18Н10 уменьшилась на ~1 мкм (до 19,9 мкм). Уменьшение толщины слоев произошло вследствие увеличения толщины переходной зоны до 7–8 мкм. Согласно результатам энергодисперсионного анализа (рис. 4), ширина зоны с ненулевым содержанием хрома увеличилась на 7 мкм — до значения 43 мкм, а с ненулевым содержанием никеля — на 3 мкм (до значения 26 мкм). Однако нарушения слоистого строения самого композиционного материала не произошло.

Структура образовавшейся переходной зоны отличается от структуры соседних слоев, и ее трудно идентифицировать, основываясь лишь на результатах микроструктурного анализа. Согласно работе [21], в зависимости от структуры и химического состава хромоникелевые стали могут относиться к аустенитному, аустенитно-ферритному, аустенитно-мартенситному, аустенитно-карбидному или аустенитно-интерметаллидному классу, а в случае быстрого охлаждения у них может образовываться структура устойчивого аустенита, неустойчивого аустенита, феррита+карбида, дельта-феррита либо мартенсита.

Приблизительно определить структуру стали в зависимости от ее химического состава после быстрого охлаждения поможет диаграмма Шеффлера (рис. 5) [22]. Она построена таким образом, что по оси ординат откладывается сумма для элементов-аустенизаторов ($Ni_{ЭКВ}$), а по оси абсцисс — сумма для элементов, расширяющих область феррита при их введении в сталь ($Cr_{ЭКВ}$). Значения элементов $Ni_{ЭКВ}$ и $Cr_{ЭКВ}$ зависят от содержания соответствующих легирующих элементов и определяются по формулам [23]:

$$\begin{aligned} Ni_{ЭКВ} &= 1 \% Ni + 1 \% Co + 0,5\% Mn + 0,3\% Cu + \\ &\quad + 25\% N + 30\% C; \\ Cr_{ЭКВ} &= 1 \% Cr + 2\% Si + 1,5\% Mo + 5\% V + 5,5\% Al + \\ &\quad + 1,75\% Nb + 1,5\% Ti + 0,75\% W \end{aligned} \quad (1)$$

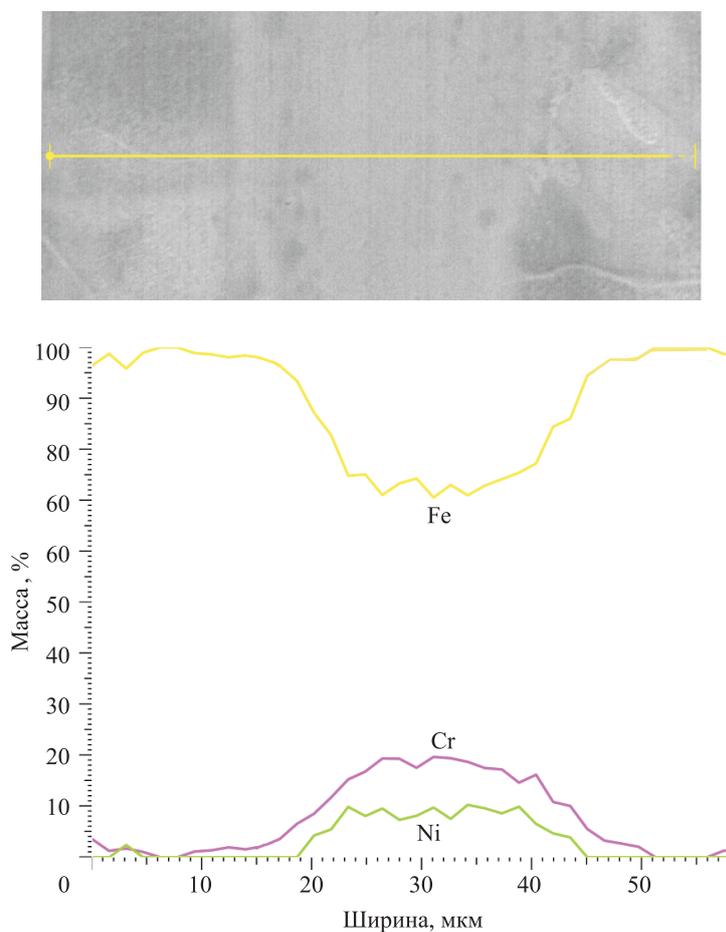


Рис. 4. Распределение никеля, хрома и железа в композиционном материале образца из стали марок 08кп и 08Х18Н10 в исходном состоянии после прокатки

В приведенном примере, учитывая химический состав двух марок стали (см. табл. 1), для стали марки 08Х18Н10 никелевый $Ni_{ЭКВ}$ и хромовый $Cr_{ЭКВ}$ эквиваленты равны, соответственно, 9,71 и 20,17 (на рис. 5 точка отмечена голубым цветом).

Несмотря на то что по данным диаграммы Шеффлера можно лишь примерно определить фазовый состав, на ней несложно проследить закономерности изменения структуры материала, связанные с изменением химического состава. Так, при уменьшении содержания хрома и никеля до определенного значения на границах стали марки 08Х18Н10 при достаточной скорости охлаждения в структуре должен выделяться мартенсит. В свою очередь, при увеличении содержания хрома и никеля на границах стали марки 08кп также должен образовываться мартенсит при достаточной скорости охлаждения.

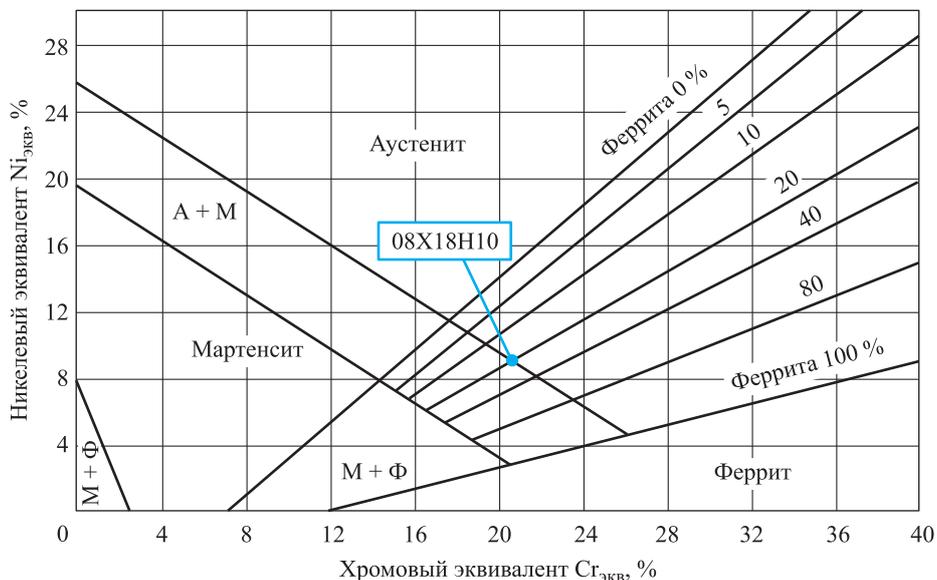


Рис. 5. Зависимость между химическим составом и структурой высоколегированных сталей (диаграмма Шеффлера) [22] с отмеченным рассчитанным положением стали марки 08X18H10

А если сопоставить фотографии микроструктуры композиционного материала (см. рис. 2, *з*) и данные энергодисперсионного анализа (см. рис. 4), то выясняется, что в прослойке, образовавшейся в результате термической обработки, содержание никеля изменяется от 0 до 9 %, а хрома — от 3...4 до 14...16 %. Справедливо предположение, что в переходной зоне между слоями могла образоваться структура мартенсита. Подтверждением такого предположения может служить тот факт, что сталь марки 07X16H6, содержащая 15,5...17,5 % Cr и 5,0...8,0 % Ni, согласно ГОСТ 5632—2014 «Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные» [20], является аустенитно-мартенситной, а сталь 05X12H2M с 11,0...12,0 % Cr и 1,2...1,6 % Ni — мартенситно-ферритной.

После нагрева прокатанного материала до температуры 1100 °С, выдержки в течение 15 мин и охлаждения на воздухе в структуре материала произошли важные изменения (рис. 6, *а, в*). Между слоями композита образовалась переходная зона толщиной приблизительно 9 мкм. При этом нарушилось слоистое строение материала — слои из стали марки 08кп оказались буквально насквозь испещрены бороздками. Вероятно, данные бороздки образовались в результате диффузии легирующих элементов (в первую очередь хрома) по границам зерен стали марки 08кп, поскольку на границах зерен сильно искажена решетка и диффузия здесь протекает быстрее [24].

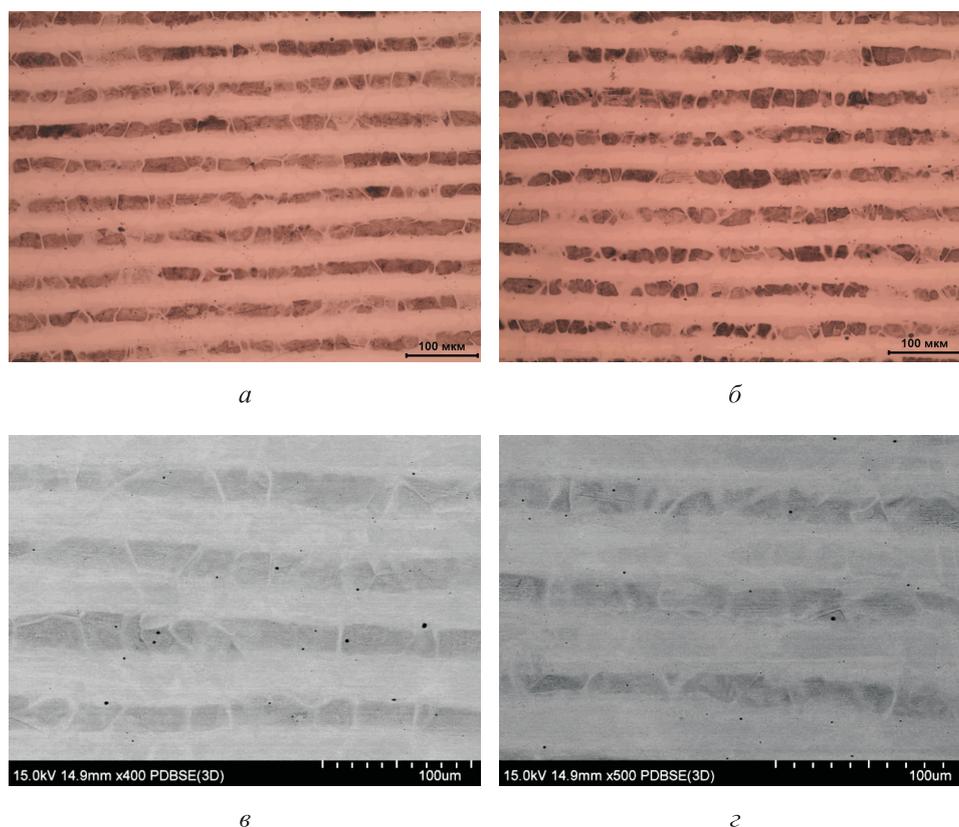


Рис. 6. Микроструктура композиционного материала из стали марок 08kp и 08X18N10 после одного (*а, б*) и двух (*в, з*) циклов нагрева до 1100 °С: *а, в* — оптическая микроскопия, $\times 200$; *б* — РЭМ, $\times 400$; *з* — РЭМ, $\times 500$

Согласно результатам энергодисперсионного анализа (рис. 7), ширина зоны с ненулевым содержанием никеля увеличилась на 7 мкм по сравнению с исходной шириной (до значения 30 мкм), ширина зоны с ненулевым содержанием хрома — на 7 мкм (до значения 41 мкм). Также из сопоставления фотографий микроструктуры материала (см. рис. 6, *а*) и данных энергодисперсионного анализа (см. рис. 7) видно, что в образовавшейся в результате термической обработки переходной зоне содержание никеля изменяется от 0 до 8...9 %, а хрома — от 2...3 до 14...16 %, т. е. их содержание практически такое же, как в случае образовавшейся переходной зоны после пятикратного нагрева до 1000 °С.

После проведения двух циклов нагрева до 1100 °С, выдержки и охлаждения в композиционном материале из стали марок 08kp и 08X18N10 увеличились размер и количество каналов, пересекающих слои бывшей стали марки 08kp (см. рис. 6, *б, з*), а также толщина переходной зоны между слоями.

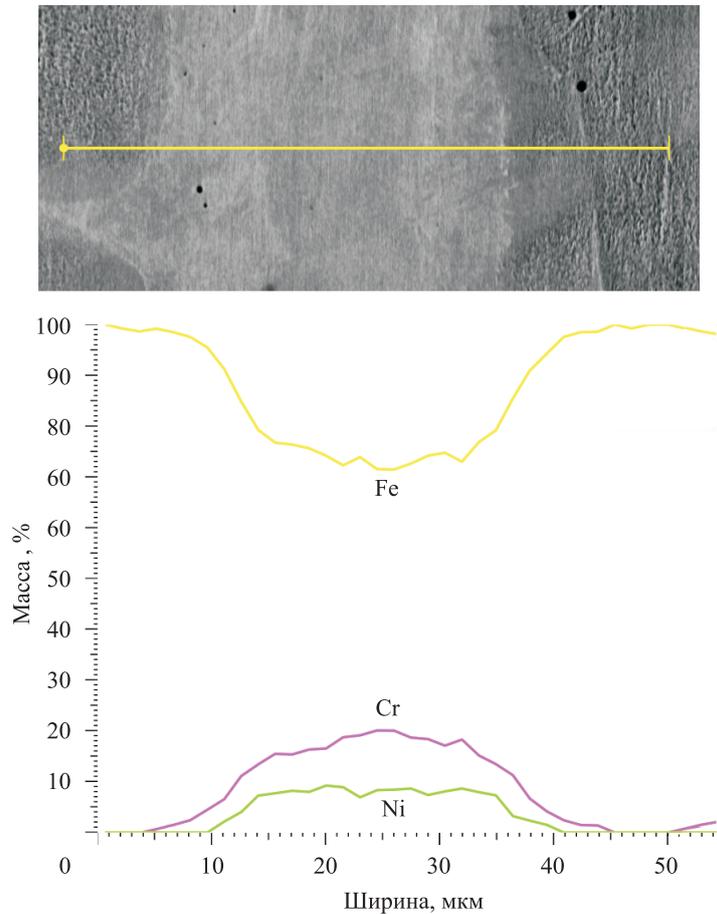


Рис. 7. Распределение хрома, никеля и железа в композиционном материале образца из стали марок 08кп и 08Х18Н10 после однократного нагрева до 1100 °С

Согласно результатам энергодисперсионного анализа (рис. 8), атомы хрома распределились по всей толщине слоев стали марки 08кп, в то время как ширина зоны с ненулевым содержанием никеля достигла 36 мкм.

В табл. 2 представлены информация об изменении средней толщины слоев и ширины зоны с ненулевым содержанием хрома и никеля в зависимости от термической обработки материала, а также длина ориентировочного диффузионного пути никеля и хрома, равная половине значения изменения ширины зоны с ненулевым содержанием элементов за время указанной в первом столбце обработки. За первый цикл нагрева до 1100 °С атомы никеля диффундировали на большие расстояния, чем за пять циклов нагрева до 1000 °С. Ширина зоны с ненулевым содержанием хрома после первого цикла нагрева до 1100 °С немного меньше, чем после пяти циклов нагрева до 1000 °С, что можно объяснить тем, что часть атомов хрома диффундировала по границам зерен стали марки 08кп.

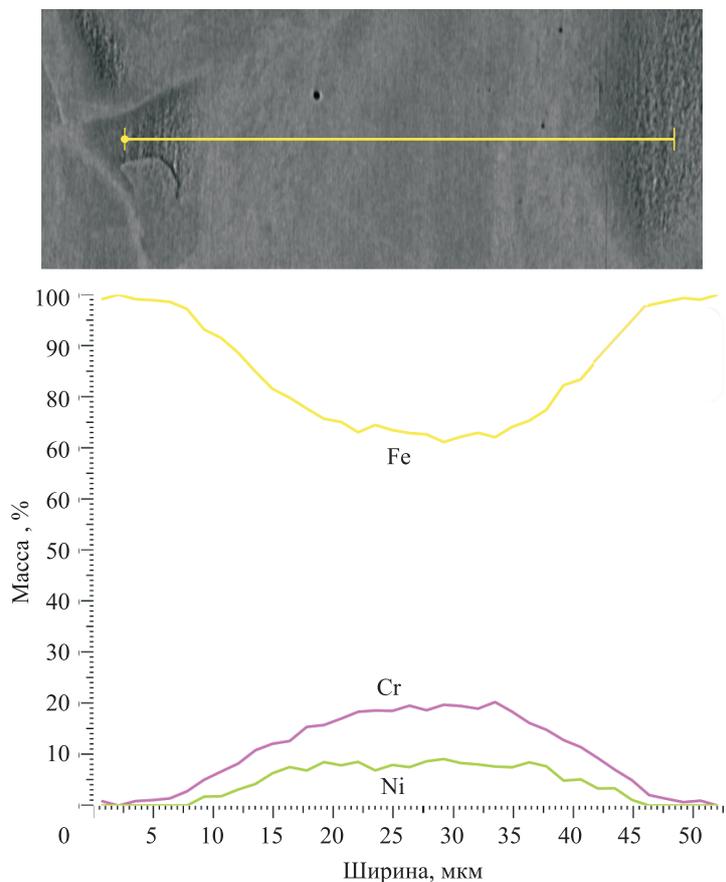


Рис. 8. Распределение хрома, никеля и железа в образце композиционного материала из стали марок 08кп и 08X18N10 после двух циклов нагрева до 1100 °С

Таблица 2

Значения параметров структуры материала образца в процессе обработки

Процесс обработки образца	Средняя толщина слоев, мкм			Ширина зоны с ненулевым содержанием элементов, мкм		Диффузионный путь элементов, не менее, мкм	
	стали марки 08X18N10	стали марки 08кп	прослойки	Ni	Cr	Ni	Cr
Прокат	20,8	23,6	2,1	23	36	2	8
Пять циклов нагрева до 1000 °С	19,9	19,2	7,2	26	43	1,5	3,5
Первый цикл нагрева до 1100 °С	Определить толщины невозможно из-за нарушения слоистого строения			30	41	3,5	2,5
Второй цикл нагрева до 1100 °С				36	44	3	1,5

Таблица 3

Значение коэффициента диффузии хрома и никеля в аустените

Температура, °С	Коэффициент диффузии D , см ² /с	
	никеля	хрома
1000	$3,4 \cdot 10^{-12}$	$4,0 \cdot 10^{-13}$
1100	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$6,5 \cdot 10^{-12}$

В общем, скорость перераспределения атомов легирующих элементов выше при 1100 °С, чем при 1000 °С, что обусловлено сравнением соответствующих коэффициентов диффузии в аустените (сталь как марки 08кп, так и марки 08Х18Н10 при 1000 °С и 1100 °С имеет структуру аустенит).

Значения коэффициентов диффузии D никеля и хрома в аустените при 1000 °С и 1100 °С, рассчитанные согласно данным, приведенным в [25], представлены в табл. 3.

Если известно значение коэффициента диффузии D , можно оценить среднее расстояние L , которое проходит диффундирующая частица за время τ , с помощью формулы [26]

$$L = (\tau D)^{1/2}, \quad (2)$$

где τ — время пребывания материала при заданной температуре; D — коэффициент диффузии при заданной температуре.

Таким образом, L — максимальное расстояние, на которое при заданной температуре могут переместиться атомы химических элементов за время τ . Рассчитанные по формуле (2) значения L для никеля и хрома за время выдержки при температурах 1000 °С и 1100 °С даны в табл. 4.

Таблица 4

**Значения расстояния L ,
на которое могут переместиться атомы никеля и хрома**

Состояние образца	Время выдержки, с	Расстояние L , мкм, прошедшее атомами	
		никеля	хрома
Исходное после проката	1000	0,58	0,20
Пять циклов нагрева до 1000 °С	4500	1,24	0,42
Первый цикл нагрева до 1100 °С	900	1,44	0,76
Второй цикл нагрева до 1100 °С	900	0,59	0,32

Проанализировав данные табл. 4, можно сделать вывод о том, что уже за первый цикл нагрева до 1100 °С диффузионный путь, пройденный атомами никеля и хрома, оказался больше, чем пройденный ими путь за пять циклов нагрева до 1000 °С, что и подтвердилось экспериментально. Вместе с тем видны и явные различия теоретических расчетов и результатов, полученных экспериментально.

В первую очередь следует отметить, что фактический диффузионный путь как никеля, так и хрома (см. табл. 2) оказался гораздо больше рассчитанного. Отчасти это можно объяснить тем, что при расчете по формуле (2) не учитывается диффузионный путь частиц за время нагрева и охлаждения образцов. Также необходимо иметь в виду, что никель и хром оказывают взаимное влияние на скорость диффузии друг друга. Согласно данным [25], введение даже 1 % (ат.) Ni увеличивает коэффициент диффузии хрома в железе в связи с уменьшением энергии активации диффузии.

При сравнении данных табл. 2 и 4 видно, что, в отличие от теоретических расчетов, по результатам которых диффузионный путь никеля оказался больше, чем у хрома, фактически атомы хрома диффундировали в слои стали марки 08кп гораздо активнее атомов никеля. Одной из причин этого может оказаться то, что при расчетах коэффициента диффузии хрома в работе [25] не учитывается его концентрационная зависимость, и поэтому могли уменьшиться полученные значения.

Заключение. С помощью прокатки был получен слоистый композиционный материал, состоящий из 100 чередующихся слоев стали марки 08X18H10 толщиной примерно 20,8 мкм и слоев стали марки 08кп толщиной 23,6 мкм. На этом этапе исследования в материале была обнаружена тонкая (толщиной ~2 мкм) переходная зона между слоями, образовавшаяся в результате диффузии никеля и хрома из стали марки 08X18H10 в сталь марки 08кп.

В результате термической обработки в материале произошло дальнейшее перераспределение легирующих элементов: хром и никель диффундировали из стали марки 08X18H10 в сталь марки 08кп (см. табл. 2). Вследствие этого пятикратный нагрев материала до 1000 °С привел к визуально определяемому изменению толщины слоев и прослойки: толщина прослойки увеличилась в результате уменьшения толщины слоев стали обеих марок. После однократного нагрева исходного слоистого материала до 1100 °С слои стали марки 08кп оказались буквально насквозь испещрены бороздками, образовавшимися в результате диффузии легирующих элементов по границам ее зерен, что привело к частичному нарушению слоистого строения композиционного материала. Повторный нагрев до 1100 °С привел к увеличению размера и количества каналов, пересекающих слои бывшей стали марки 08кп.

Показано, что в прослойке содержание никеля изменяется от 0 до 8...9 %, а хрома — от 2...3 до 14...16 %. Основываясь на диаграмме Шеффлера, можно предположить, что структура переходной зоны состоит либо из мартенсита, либо из смеси мартенсита с ферритом или аустенитом.

Установлено, что подсчитанные на различных этапах исследования диффузионные расстояния, пройденные атомами хрома и никеля (см. табл. 4), оказались гораздо меньше фактических расстояний, которые они преодолели. Отчасти такое различие можно объяснить тем, что при расчетах не учитывался диффузионный путь частиц во время нагрева и охлаждения образцов.

В отличие от теоретических расчетов, диффузионный путь атомов хрома оказался гораздо больше, чем у атомов никеля. Причиной этого может служить то, что при расчетах коэффициента диффузии D хрома в аустените не учитываются его концентрационная зависимость, а также взаимовлияние хрома и никеля на коэффициенты диффузии друг друга.

Результаты проведенных исследований приводят к выводу, что сохранение слоистого строения материала определяется диффузией никеля, поскольку он перераспределяется в материале гораздо медленнее хрома. При уменьшении содержания никеля в слоях стали марки 08X18H10 и, соответственно, увеличении его содержания в слоях стали марки 08кп, в которые уже успел диффундировать хром, образуется новая структура, отличная от структуры двух соседних слоев.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю., Абдуллин М.Р., Лимонин М.В. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов. *Перспективные материалы*, 2016, № 10, с. 5–19.
- [2] Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе. *Цветные металлы*, 2016, № 8, с. 86–91.
- [3] Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*, 2011, № SP2, с. 174–183.
- [4] Карпов М.И., Внуков В.И., Волков К.Г., Медведь Н.В., Ходос И.И., Абримова Г.Е. Возможности метода вакуумной прокатки как способа получения многослойных композитов с нанометрическими толщинами слоев. *Материаловедение*, 2004, № 1, с. 48–53.
- [5] Каблов Е.Н., Антипов В.В., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и композитов в конструкциях летательных аппаратов нового поколения. *Вестник машиностроения*, 2020, № 12, с. 46–52.
- [6] Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых метал-

- лополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов. *Авиационные материалы и технологии*, 2020, № 1 (58), Ст. 06.
DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53 (дата обращения 14.04.2021).
- [7] Schmiedt A., Luecker L., Kolesnikov A., Plokhikh A.I., Walther F. Production and microstructure-based fatigue assessment of metallic AISI 304/430 multi-layer materials produced by hot pack rolling. *Materials testing*, 2017, vol. 59 (2), pp. 123–129.
- [8] Антипов В.В., Чесноков Д.В., Козлов И.А., Волков И.А., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2018, № 4 (64), ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 14.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65
- [9] Орешко Е.И., Ерасов В.С., Лашов О.А., Подживотов Н.Ю., Качан Д.В. Расчет напряжений в слоистом материале. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2018, № 10 (70), Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 10.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-93-106
- [10] Карпов М.И., Внукон В.И., Волков К.Г., Медведь Н.В., Ходос И.И., Абросимова Г.Е. Возможности метода вакуумной прокатки как способа получения многослойных композитов с нанометрическими толщинами слоев. *Материаловедение*, 2004, № 1, с. 48–53.
- [11] Плохих А.И. О возможности применения многослойных металлических материалов для изготовления баллонов высокого давления. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*, 2014, № 4, с. 97–106.
- [12] Колесников А.Г., Плохих А.И. Конструкционные металлические материалы с субмикро- и наноразмерной структурой. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение*, 2010, Спец. вып., с. 44–52.
- [13] Колесников А.Г., Плохих А.И., Михальцевич И.Ю. Исследование возможности получения субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки. *Производство проката*, 2010, № 3, с. 25–31.
- [14] Коржов В.П., Карпов М.И., Прохоров Д.В. Многослойная структура и высокотемпературная прочность жаропрочных материалов на основе соединений ниобия с алюминием и кремнием, полученных из композитов Nb-Al и Nb-Si. *Физика и техника высоких давлений*, 2013, т. 23, № 1, с. 99–107.
- [15] Фирстов С.А., Карпов М.И., Коржов В.П., Горбань В.Ф., Крапивка Н.А., Строганова Т.С. Структура и свойства слоистого композита из высокоэнтропийного сплава с карбидным и интерметаллическим упрочнением. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2015, т. 79, № 9, с. 1267–1275.
- [16] Карпов М.И., Коржов В.П., Кийко В.М., Прохоров Д.В., Толстун А.Н. Влияние термообработки под давлением на структуру слоистых композитов Ni/Al. *Перспективные материалы*, 2011, № S13, с. 704–712.
- [17] Худнев А.А., Плохих А.И., Дворецков Р.М., Щетанов Б.В. Исследование диффузии легирующих элементов в процессе циклической термической обработки слоистого композиционного материала на основе хромистой и углеродистой сталей. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2021, № 4 (98), ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-74-91
- [18] Колесников А.Г., Плохих А.И., Комисарчук Ю.С., Михальцевич И.Ю. Исследование особенностей формирования субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2010, № 6, с. 44–49.

- [19] Плохих А.И., Власова Д.В., Ховова О.М., Полянский В.М. Исследование влияния диффузионной подвижности легирующих элементов на стабильность структуры многослойных металлических материалов. *Наука и образование: электронное научно-техническое издание*, 2011, № 11. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/262116.html> (дата обращения 14.03.2021).
- [20] ГОСТ 5632–2014. *Нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные*. Москва, Изд-во Стандартиформ, 2015, 54 с.
- [21] Химушин Ф.Ф. *Нержавеющие стали*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Металлургия, 1967, 800 с.
- [22] ГОСТ 33260–2015. *Арматура трубопроводная. Металлы, применяемые в арматуростроении. Основные требования к выбору материалов*. Москва, Стандартиформ, 2016, 72 с.
- [23] Пиккеринг Ф.Б. *Физическое металловедение и разработка сталей*. Москва, Металлургия, 1982, 184 с.
- [24] Бокштейн Б.С. *Диффузия в металлах*. Москва, Металлургия, 1978, 248 с.
- [25] Блантер М.Е. *Фазовые превращения при термической обработке стали*. Москва, Металлургиздат, 1962, 268 с.
- [26] Табачикова Т.И., Яковлева И.Л., Плохих А.И., Дельгадо Р.С. Исследование многослойного материала на основе нержавеющей сталей, полученного методом горячей пакетной прокатки. *Физика металлов и металловедение*, 2014, т. 115, № 4, с. 431–441.

Статья поступила в редакцию 20.07.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Худнев А.А., Плохих А.И., Большакова А.Н., Дворецков Р.М. Влияние циклической термической обработки на структуру слоистого композиционного материала из сталей 08кп и 08Х18Н10. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2115>

Худнев Алексей Александрович — техник лаборатории «Металлических композиционных материалов» ФГУП «ВИАМ». Область деятельности и научные интересы: создание дисперсно-упрочненных композиционных материалов на основе тугоплавких металлов методами порошковой металлургии, исследование слоистых композиционных материалов. e-mail: a.hudnev96@mail.ru

Плохих Андрей Иванович — канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель Учебного Демонстрационного Центра НУК МТ (УДЦ НУК МТ), заведующий лабораторией «Прочность конструкционных материалов» УДЦ НУК МТ. Область деятельности и научные интересы: разработка нового класса конструкционных металлических материалов, имеющих ламинарное, многослойное строение. e-mail: plokhikh@bmstu.ru

Большакова Александра Николаевна — канд. хим. наук, начальник лаборатории «Металлические композиционные материалы» ФГУП «ВИАМ». Область деятельности и научные интересы: металлические и металлокерамические композиционные материалы на основе тугоплавких металлов и их сплавов. e-mail: alexa20486@mail.ru;

Дворецков Роман Михайлович — канд. хим. наук, начальник сектора лаборатории «Спектральные, химико-аналитические исследования и эталонные образцы» ФГУП «ВИАМ». Область деятельности и научные интересы: аналитическая химия. e-mail: r.dvoretzkov@gmail.ru.

Thermal cycling effect on a structure of multilayer composite material made of 08kp and 08Kh18N10 steels

© A.A. Khudnev¹, A.I. Plokhikh², A.N. Bolshakova¹, R.M. Dvoretsov¹

¹Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”, Moscow, 105005, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article researches the effect of five cycles of heating to a temperature of 1000 °C and two cycles of heating to a temperature of 1100 °C on the structure of a layered composite material consisted of 100 alternating layers of 08kp and 08Kh18N10 steels (one layer thickness is ~22 μm). As a result of the nickel and chromium diffusion during thermocycling, the thickness of the layers changed and an interlayer with a structure different from the structure of neighboring layers was formed. Heating to 1100 °C also has led to a partial disarrangement of the layered material structure. It was found that the real diffusion path of alloying elements during heat treatment significantly exceeds the calculated one, and chromium atoms are redistributed between the layers of the material much more actively than nickel atoms.

Keywords: layered composite material, steel 08kp, steel 08Kh18N10, diffusion, thermocycling, microstructure, hot rolling

REFERENCES

- [1] Podzhivotov N.Yu., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Yu., Abdullin M.R., Limonin M.V. *Perspektivnye materialy — Perspective Materials*, 2016, no. 10, pp. 5–19.
- [2] Kablov E.N., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. *Tsvetnye metally — Non-ferrous metals*, 2016, no. 8, pp. 86–91.
- [3] Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2011, no. SP2, pp. 174–183.
- [4] Karpov M.I., Vnukov V.I., Volkov K.G., Medved N.V., Khodos I.I., Abrosimova G.E. *Materialovedenie (Material Science)*, 2004, no. 1, pp. 48–53.
- [5] Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N. *Vestnik mashinostroeniya — Russian Engineering Research*, 2020, no. 12, pp. 46–52.
- [6] Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. *Aviatsionnye materialy i tehnologii — Aviation materials and technologies*, 2020, no. 1 (58), Art. 06. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53
- [7] Schmiedt A, Luecker L, Kolesnikov A, Plokhikh A I, Walther F. *Materials testing*, 2017, vol. 59 (2), pp. 123–129.
- [8] Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kozlov I.A., Volkov I.A., Petrova A.P. *Elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Trudy VIAM» — Electronic scientific journal “Proceedings of VIAM”*, 2018, no. 4 (64), Art. 07. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65
- [9] Oreshko E.I., Erasov V.S., Lashov O.A., Podzhivotov N.Yu., Kachan D.V. *Elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Trudy VIAM» — Electronic scientific journal “Proceedings of VIAM”*, 2018, no. 10 (70), Art. 11. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-93-106

- [10] Karpov M.I., Vnukov V.I., Volkov K.G., Medved N.V., Khodos I.I., Abrosimova G.E. *Materialovedenie (Material Science)*, 2004, no. 1, pp. 48–53.
- [11] Plokhikh A.I. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie — Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, Materials Science*, 2014, no. 4, pp. 97–106.
- [12] Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya «Priborostroenie» — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2010, Spec. iss., pp. 44–52.
- [13] Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Mikhaltsevich I.Yu. *Proizvodstvo prokata — Rolling*, 2010, no. 3, pp. 25–31.
- [14] Korzhov V.P., Karpov M.I., Prokhorov D.V. *Fizika i tekhnika vysokih davleniy — Physics and High Pressure Technology*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 99–107.
- [15] Firstov S.A., Karpov M.I., Korzhov V.P., Gorban V.F., Krapivka N.A., Stroganova T.S. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya fizicheskaya — Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2015, vol. 79, no. 9, pp. 1267–1275.
- [16] Karpov M.I., Korzhov V.P., Kiyko V.M., Prokhorov D.V., Tolstun A.N. *Perspektivnye materialy — Perspective Materials*, 2011, no. S13, pp. 704–712.
- [17] Khudnev A.A., Plokhikh A.I., Dvoretsov R.M., Shchetanov B.V. *Elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Trudy VIAM» — Electronic scientific journal “Proceedings of VIAM”*, 2021, no. 4 (98), Art. 06.
DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-74-91
- [18] Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Komisarchuk Yu.S., Mikhaltsevich I.Yu. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov — Metal Science and Heat Treatment*, 2010, no. 6, pp. 44–49.
- [19] Plokhikh A.I., Vlasova D.V., Hovova O.M., Polyansky V.M. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhnicheskij zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/262116.html> (accessed March 14, 2021).
- [20] *GOST 5632–2014. Nerzhavayushchie stali i splavy korrozionnostoykie, zharostoykie i zharoprochnye* [State Standard 5632–2014. Stainless steels and corrosion-resistant, heat-resistant and refractory alloys]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 54 p.
- [21] Khimushin F.F. *Nerzhavayushchie stali* [Stainless steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967, 800 p.
- [22] *GOST 33260–2015. Armatura truboprovodnaya. Metally, primenyaemye v armaturostroenii. Osnovnye trebovaniya k vyboru materialov* [State Standard 33260–2015. Pipe fittings. Metals used in valve industry. Basic requirements for the selection of materials] Moscow, Standartinform Publ., 2016, 72 p.
- [23] Pickering F.B. *Physical Metallurgy and the Design of Steels*. Applied Science Publishers, 1978, 275 p. [In Russ.: Pickering F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka staley*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 184 p.].
- [24] Bokshteyn B.S. *Diffuziya v metallah* [Diffusion in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 248 p.
- [25] Blanter M.E. *Fazovye prevrashcheniya pri termicheskoy obrabotke stali* [Phase transformations during steel heat treatment]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962, 268 p.
- [26] Tabachikova T.I., Yakovleva I.L., Plokhikh A.I., Delgado R.S. *Fizika metallov i metallovedenie — The Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 4, pp. 431–441.

Khudnev A.A., Technician, Laboratory of Metallic Composite Materials, All-Russian Institute of Aviation Materials. Field of scientific interests: creation of dispersion-hardened composite materials based on refractory metals by powder metallurgy methods, research of layered composite materials. e-mail: a.hudnev96@mail.ru

Plokhikh A.I., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University, head of the Training Demonstration Center NUK MT (TDC NUK MT), head of the laboratory "Strength of structural materials" TDC NUK MT. Field of scientific interests: development of a new class of structural metallic materials with a laminar, multilayer structure. e-mail: plokhikh@bmstu.ru

Bolshakova A.N., Cand. Sc. (Chem.), Head of the Laboratory of Metallic Composite Materials, All-Russian Institute of Aviation Materials. Field of scientific interests: metal and cermet composite materials based on refractory metals and their alloys. e-mail: alexa20486@mail.ru

Dvoretsov R.M., Cand. Sc. (Chem.), Head of the sector of the Laboratory of Spectral, Chemical-Analytical Research and Reference Samples, All-Russian Institute of Aviation Materials. Field of scientific interests: analytical chemistry. e-mail: r.dvoretsov@gmail.ru