

УДК: 621.791: 519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-12-19

*Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова, В. Н. Трутнев***ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ ПЯТИСЛОЙНОГО ТИТАНО-СТАЛЬНОГО КОМПОЗИТА
ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: arisova1954@mail.ru

Приведены результаты исследований структуры пятислойного сваренного взрывом титано-стального композита VT1-0+08X18H10T после горячей прокатки при температуре 850 °С. Проводился анализ диффузионного взаимодействия в зонах соединения композита и напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: титан, сталь, слоистые композиты, прокатка, деформация, микроструктура, диффузия, моделирование

*L. M. Gurevich, V. N. Arisova, V. N. Trutnev***STUDY OF THE STRUCTURE AND STRESS-STRAIN STATE
OF AN EXPLOSION-WELDED FIVE-LAYER TITANIUM-STEEL
COMPOSITE AFTER HOT ROLLING****Volgograd State Technical University**

The results of studies of the structure of a five-layer titanium-steel composite VT1-0-08X18H10T, welded by explosion, after hot rolling at a temperature of 850 °C are presented. An analysis was carried out of the diffusion interaction in the zones of connection of the composite and the stress-strain state.

Keywords: titanium, steel, layered composites, rolling, deformation, microstructure, diffusion, modeling

На кафедре «Материаловедение и композиционные материалы» ВолгГТУ разработана комплексная технология получения слоистых металло-интерметаллидных композитов (СМИК), включающая сварку взрывом многослойного пакета (СВ), последующую прокатку до заданной толщины слоев и диффузионный отжиг (высокотемпературный нагрев для образования на каждой из границ разнородных металлов в прокатанном композите сплошных интерметаллидных прослоек, являющихся упрочняющей фазой в этом композите, с заданным объемным соотношением интерметаллидных и основных слоев. При выборе технологических параметров операций используется накопленный научный и технологический задел по получению слоистых металлических композитов (СМК) из так называемых «трудносвариваемых» между собой металлов и сплавов [1–3]. Технология позволяет максимально приблизить форму получаемого хрупкого при комнатной температуре металло-интерметаллидного материала или полуфабриката к форме готовой детали и сводит к минимуму количество операций соединения и обработки.

В работах [4–10] приведены результаты исследований структуры и свойств пятислойного

титано-стального композита VT1-0-08X18H10T после СВ и последующей термической обработки. Основное внимание уделялось зонам вблизи поверхностей соединения слоев, особенностям формирования в них фаз и структурных составляющих.

Благодаря компьютерным технологиям стало возможным моделирование процессов деформирования анизотропных композитных материалов с целью изучения их поведения, а также прогнозирования конечных свойств без значительных временных, финансовых и материальных затрат.

Неравномерность деформации слоистых композитов при прокатке приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут вызывать изгиб, расслоение и разрыв по границам соединения слоев или внутри формирующихся хрупких слоев. Это зависит от соотношения величин сопротивления деформации составляющих композита, толщин и расположения слоев, параметров геометрии очага деформации, сил трения между валками и наружными поверхностями композита, напряжений на границах соединения слоев.

Целью настоящей работы являлось изучение деформированного состояния после горя-

чей прокатки при температуре 850 °С сваренного взрывом пятислойного титано-стального композита и использование моделирования для прогнозирования деформации слоев при прокатке исследуемого композита при той же температуре.

Материалы и методы исследования

Исследовался пятислойный композит, состоящий из трех слоев псевдо-α титанового сплава ВТ-20 (легированного 5,5–7,0 % масс. Al; 1,5–2,5 % масс. Zr; 0,8–2,5 % масс. V; 0,5–2,0 % масс. Mo) и двух слоев аустенитной коррозионностойкой стали 08X18H10T. СВ производили по одновременной плоскопараллельной схеме: трех титановых (толщина 1,2 мм) и двух стальных (толщина 1 мм) слоев. Горячую прокатку (ГП) проводили на двухвалковом прокатном стане ДУО с обжатием 7–9 %.

Микроструктуру исследовали на оптическом микроскопе «Olympus BX61» и растровом двухлучевом электронно-ионном микроскопе системы Versa3D DualBeam, который снабжен энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max (Oxford Instruments) для определения локального химического состава. Фазовый состав определяли на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO. Для анализа дифрактограмм и расшифровки фазового состава использовали лицензионное программное обеспечение к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием базы данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data).

Измерение микротвердости проводили на приборе PMT-3М при нагрузке на индентор 1,0 Н.

Для 3D-моделирования процессов прокатки пятислойного титано-стального композита при-

менили программный комплекс SIMULIA/Abaqus, предназначенный для конечно-элементных прочностных расчетов и содержащий модуль Abaqus/Explicit, использующий схему интегрирования методом конечных элементов для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Верификация расчетных моделей проводилась с использованием экспериментальных данных по распределению деформаций в поперечном сечении сваренного взрывом пятислойного титано-стального композита после прокатки при температуре 850 °С, соответствующей температуре горячей прокатки данного композита. При задании расчетных схем материала слоев использовали модель пластичности Джонсона–Кука, позволяющей учитывать изменение предела текучести за счет изменения величины и скорости деформации, так и температуры [11]:

$$\sigma_Y = \left(A + B \epsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right],$$

где ϵ_p – эффективная пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; T – температура прокатки; A – предел текучести неупрочненного материала, B – коэффициент упрочнения при деформировании, C – коэффициент зависимости упрочнения от скорости деформирования, n , m , ϵ_0 – параметры модели; $\dot{\epsilon}_0$ и $\dot{\epsilon}_p$ – первые производные по времени от величин ϵ_0 и ϵ_p .

В табл. 1 при задании расчетных схем материала представлены коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука.

Таблица 1

Использованные коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука

Материал	Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука [15]					
	A, МПа	B, МПа	m	n	T_m , К	T_r , К
Сталь 08X18H10T	280	1215	0.61	0.517	1773	273
Титановый сплав ВТ-20	900	510	0.421	0.577	1940	273

В 3D-модели прокатки (рис. 1) с неизменным идеализированным очагом деформации вращающиеся с заданной угловой скоростью валки принимались абсолютно жесткими с фиксированным положением осей, расстояние между которыми соответствовало обжатию композита на различных проходах эксперимен-

тальной прокатки. Образец проходил через шесть последовательно установленных пар валков с постоянно уменьшающимся зазором между валками (табл. 2), что позволяло учитывать изменение свойств слоев композита и их обжатий на каждом этапе моделируемой прокатки.

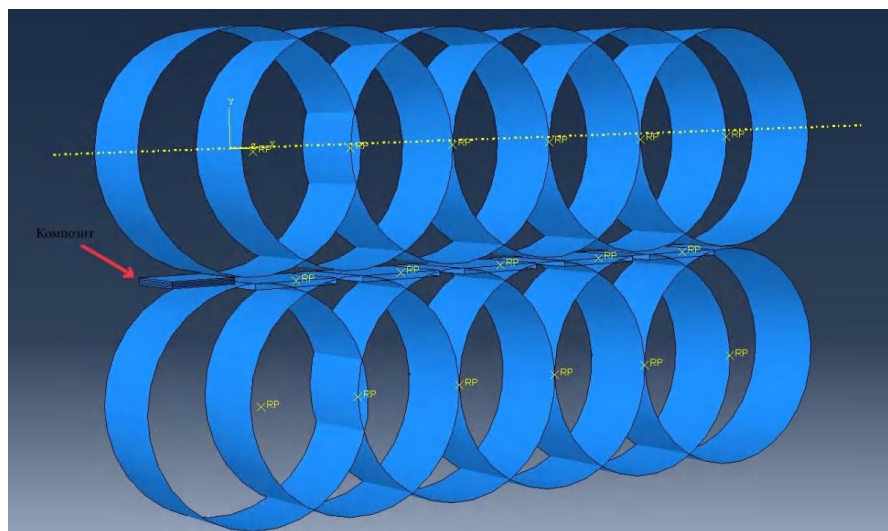


Рис. 1. 3D-схема моделирования прокатки пятислойного композита BT-20+08X18H10T с помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus

Таблица 2

Используемые при моделировании зазоры между валками

Пара валков	1	2	3	4	5	6
Величина зазора, мм	4,58	4,08	3,50	2,96	2,33	1,75

Коэффициент трения между вращающимися с угловой скоростью 20 радиан/с валками и поверхностями полосы слоистого композита принимали $f = 0,3$. Перемещение полосы производилось за счет сил трения и под действием используемого в прокатных станах натяжения. Моделируемая полоса по толщине (исходная толщина слоев BT-20 – 1,2 мм, 08X18H10T – 1 мм,) и протяженности соответствовала использованным в реальных экспериментах прокатанным образцам. Размер стороны квадратной ячейки сетки выбирался из-за малости толщины полосы равным 0,1 мм, что обеспечивало достаточную точность при приемлемом времени расчета.

**Результаты исследований
и их обсуждение**

Как было показано в [4; 11] в процессе прокатки исследуемого сваренного взрывом пятислойного титано-стального композита с суммарными обжатиями 7–9 % при температуре 850 °C наиболее интенсивно (на 9–11 %) уменьшается толщина внешних титановых слоев (после СВ верхний слой имел толщину 1030 мкм, нижний – 1060 мкм, а после прокатки – 840 и 950 мкм соответственно), слои коррозионно-стойкой стали и внутренний титановый слой деформировались на 4–5 %.

Воздействие температуры при нагреве под прокатку приводило к образованию диффузионных прослоек толщиной до 15–16 мкм на всех границах композита (рис. 2). Сравнение толщин диффузионных прослоек после термической обработки и после горячей прокатки при температуре 850 °C не выявило различий. Микротвердость этих прослоек составляет 4,5 ГПа, при этом микротвердость титановых слоев – 3,3–3,5 ГПа, а нержавеющей стали 2,8–3,0 ГПа. Диффузия направлена преимущественно в сторону титановых слоев.

Электронно-микроскопические исследования (рис. 3) показали, что диффузионная зона состоит из двух прослоек: очень тонкой (~ 1 мкм), примыкающей к границе титанового сплава со сталью, и второй широкой прослойки толщиной до 15 мкм, распространяющейся вглубь BT-20. При электронно-микроскопическом исследовании в широкой прослойке выявляются игольчатые включения, свидетельствующие о протекании превращения мартенситного типа $\beta \rightarrow \alpha'$. Появление при нагреве до 850 °C (ниже традиционно указываемой температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода в титане 882 °C) β -фазы, по-видимому, связано со снижением температуры фазового превращения вследствие диффузии в титановый сплав β -стабилизаторов (Fe и Cr).

Химический состав тонкой диффузионной прослойки (рис. 3, табл. 3) свидетельствует, что

она легирована всеми компонентами, входящими в состав стали (Fe, Cr и Ni).

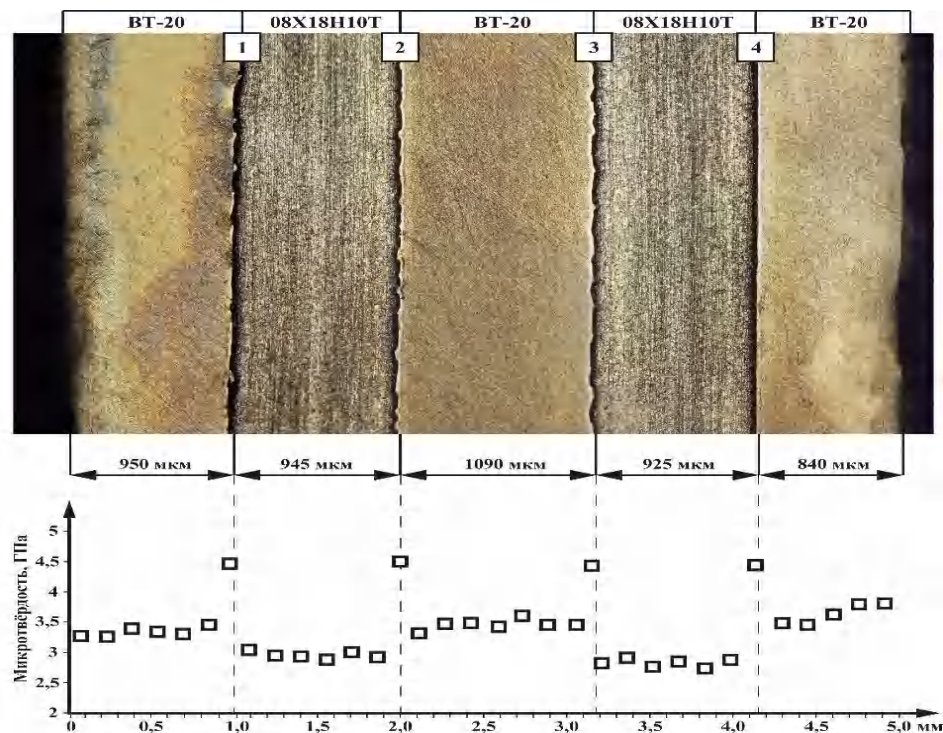


Рис. 2. Микроструктура и распределение микротвердости по сечению пятислойного титано-стального композита BT-20+08X18H10T после прокатки (цифрами обозначены номера границ)

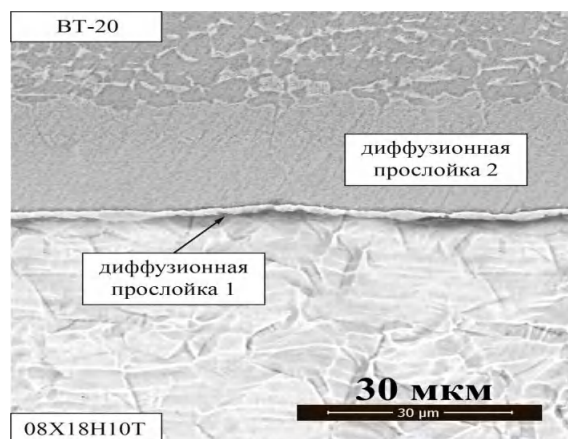


Рис. 3. Диффузионные прослойки на границах после горячей прокатки. x500

Таблица 3

Результаты точечного энергодисперсионного анализа диффузионной прослойки 1

Элемент	Содержание		
	Массовые %	Атомные %	Ошибка, %
Ti	26.87	28.91	1.94
Cr	12.85	12.74	3.05
Fe	51.78	47.78	2.43
Ni	5.47	4.8	6.81
Al	3.02	5.77	10.06

Распределение химических элементов в околошовной зоне подвергнутого горячей прокатке композиционного материала представлено на рис. 4. В широкой диффузионной прослойке содержание алюминия постоянно по толщине (около 12 % ат.) и соответствует со-

держанию в титановом сплаве ВТ-20. Содержание титана в широкой диффузионной прослойке монотонно снижается по мере приближения к узкой диффузионной прослойке от 87 % ат. до 75 % ат, одновременно растет содержание железа и хрома.

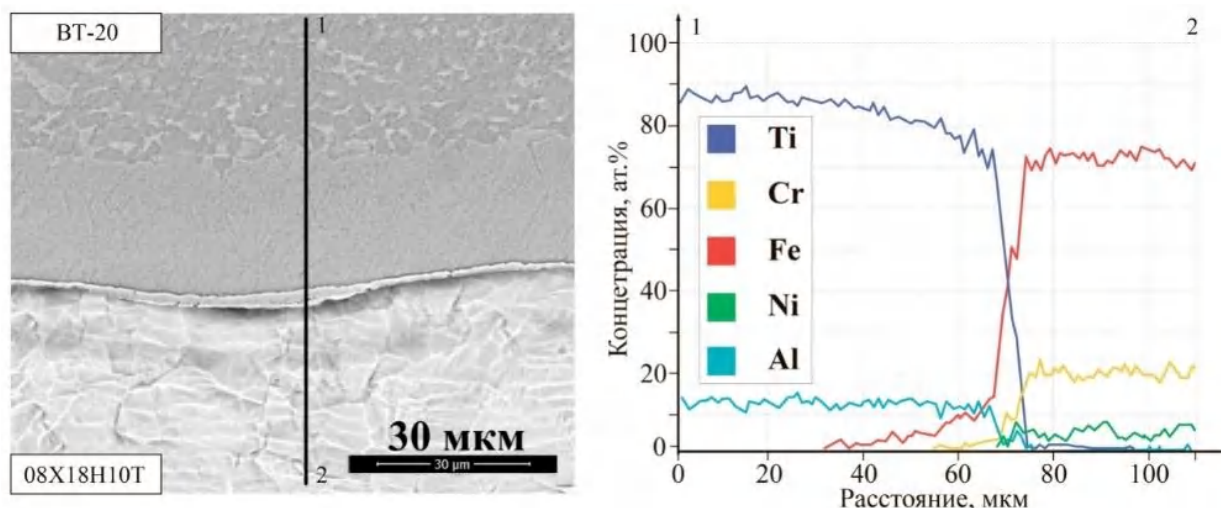


Рис. 4. Химический состав диффузионной прослойки после прокатки

С помощью рентгеноструктурного анализа было установлено наличие в зоне диффузионного взаимодействия интерметаллидов Cr_2Ti , Fe_2Ti , Ni_2Ti , образование которых объясняет повышение твердости прослоек.

Проведенное моделирование показало изменение распределения деформации в различных зонах титано-стального композиционного материала. Рассчитанные с помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus по 3D-модели относительные деформации пятислойного компо-

зиционного материала на различных стадиях прокатки приведены на рис. 5–6. Деформация слоев композита из стали 08X18H10T несколько выше, чем слоев титанового сплава.

Различия в исходных прочностных характеристиках, составляющих композита и неравномерность распределения между ними высотной деформации привели после прокатки к нарушению соотношения толщин слоев и величины обжатия слоев практически во всем промоделированном диапазоне (рис. 7).

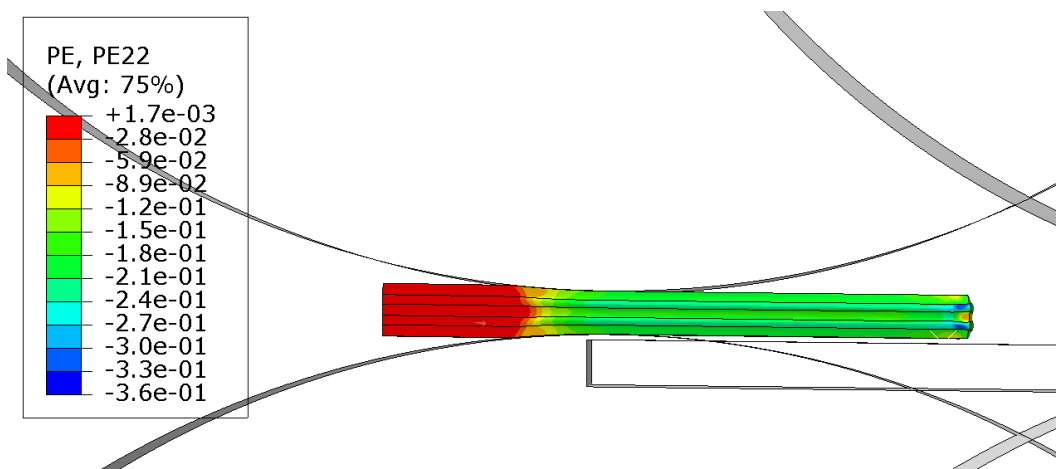


Рис. 5. Высотная деформация слоев после 1-й пары валков при температуре прокатки 850 °C

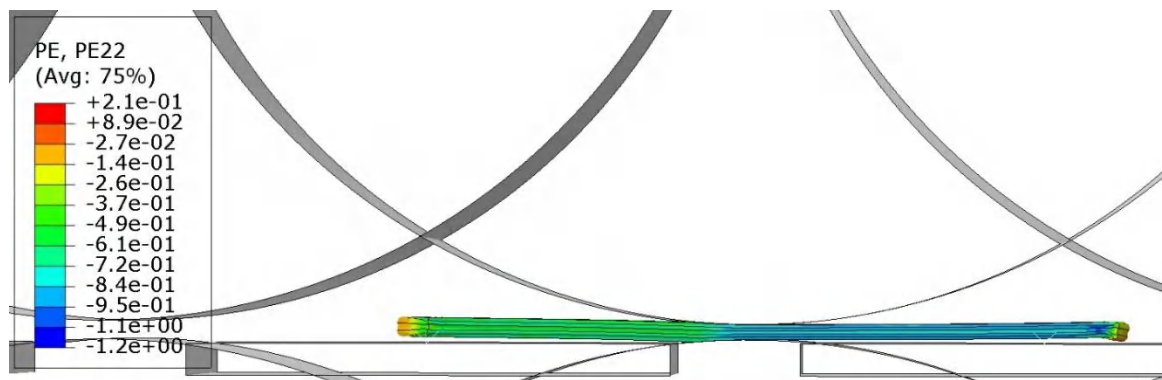


Рис. 6. Высотная деформация слоев после 5-й пары валков при температуре прокатки 850 °С

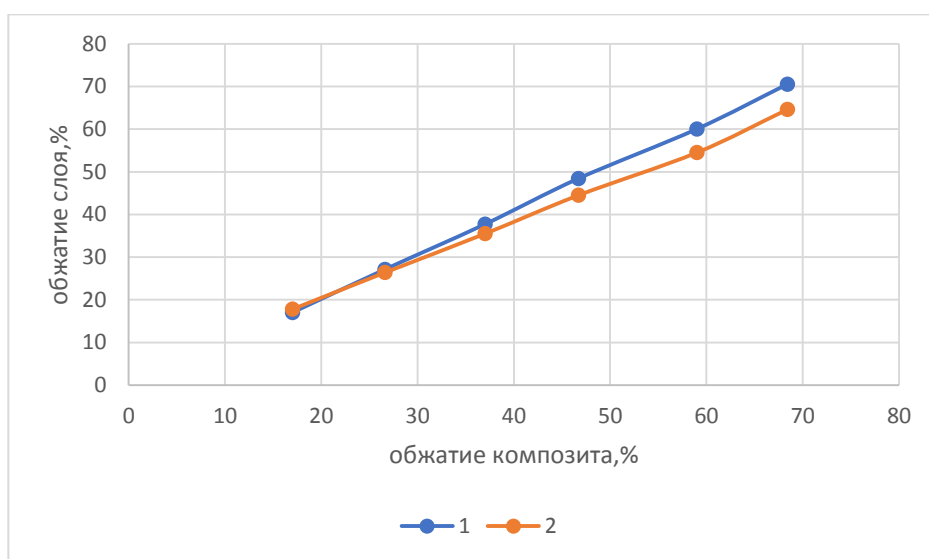


Рис. 7. Зависимость обжатия слоев от общего обжатия композита:
1 – VT-20; 2 – 08X18H10T

При прохождении композиционного материала через очаг деформации слои титанового сплава вовлекаются в деформацию последовательно от прилегающих к зоне контакта с валком до глубинного, который испытывают сдерживающее воздействие труднодеформируемых стальных слоев (рис. 7). Было установлено, что деформация слоев титанового сплава

была несколько больше, чем стали (табл. 4), причем это различие постоянно увеличивалось по мере роста величины обжатия, что, вероятно, связано с хорошо известной склонностью аустенитных сталей типа 08X18H10T или 12X18H10T к резкому повышению твердости и предела текучести при наклепе.

Таблица 4

Изменение высотной деформации слоев титанового сплава VT-20 и аустенитной стали 08X18H10T по мере прохождения валков

Материал	Обжатие слоев при прохождении валков, %					
	1-я пара	2-я пара	3-я пара	4-я пара	5-я пара	6-я пара
Сплав VT-20	17	27	38	48	60	70
Сталь 08X18H10T	17	26	35	44	54	64

На рис. 8, 9 представлены изменения распределения напряжений Мизеса в титано-стальном композите в процессе прокатки по дан-

ным моделирования с помощью пакета SIMULIA/Abaqus при прохождении через 1 и 5 пары валков.

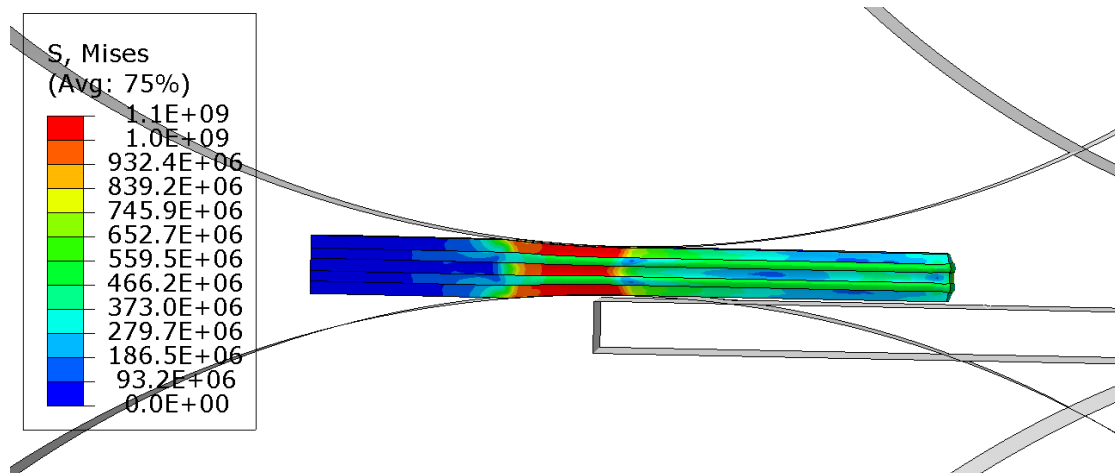


Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в композите при прохождении 1-й пары валков при температуре прокатки 850 °С

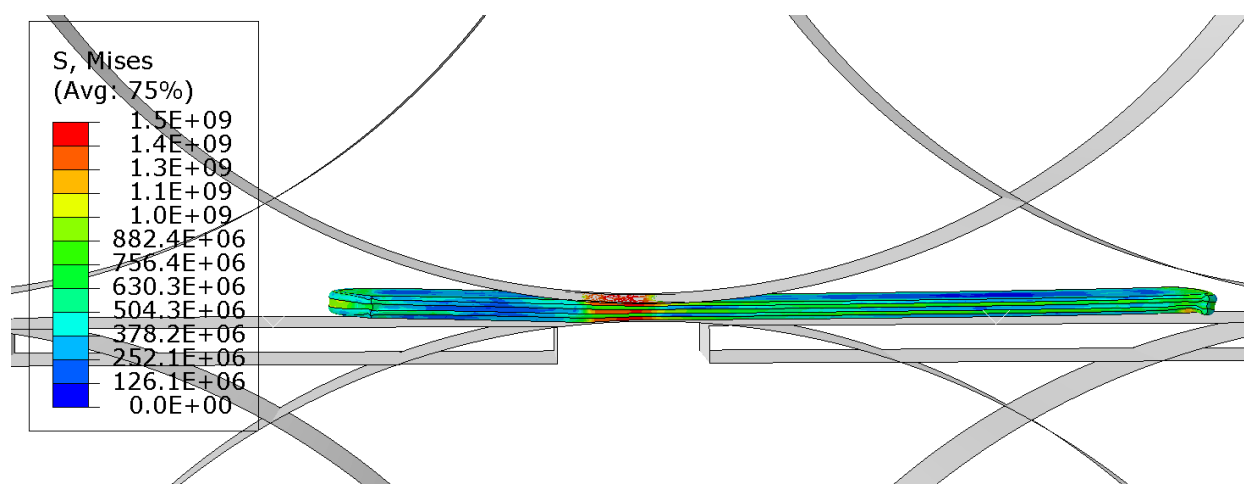


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в композите при прохождении 5-й пары валков при температуре прокатки 850 °С

При прохождении первой пары валков в композите максимальные напряжения Мизеса составили в титановом слое ВТ-20 около 1000 МПа с локализацией в зоне максимальной деформации. При дальнейшем прохождении зазоров между парами валков максимальные напряжения Мизеса по-прежнему локализовались в слое титанового сплава, но происходило постепенное их сближение с напряжениями в стальном слое, что объясняется с уже упомянутой высокой склонностью аустенитных сталей к повышению прочностных характеристик в процессе наклепа. При прохождении 5 пары валков напряжения в слое титанового сплава достигали почти 1400 МПа, а в слое стали около 800 МПа.

Моделирование показало, что проведение горячей прокатки пластины небольших размеров исследуемого пятислойного титано-стального композита при температуре 850 °С не позволяет достичь равномерного распределения напряжений и деформаций после прохождения шести пар валков. По-видимому, при увеличении размеров пластины (в первую очередь, ее ширины) распределения деформаций будет более равномерным.

Выводы

1. Показано, что горячая прокатка пятислойного сваренного взрывом титано-стального композита ВТ1-0 – 08Х18Н10Т с суммарными обжатиями 7–9 % при температуре 850 °С приводит

к наиболее интенсивной деформации на 9–11 % внешних титановых слоев, слои коррозионно-стойкой стали и внутренний титановый слой деформировались на 4–5 %.

2. При воздействии температуры в околошовных зонах образуются диффузионные прослойки: тонкая толщиной около 1 мкм и широкая толщиной до 15–16 мкм. В зоне диффузионного взаимодействия выявляются интерметаллиды Cr_2Ti , Fe_2Ti , Ni_2Ti , образование которых объясняет повышение твердости прослоек.

3. Проведенное моделирование показало изменение распределения деформации и эквивалентных напряжений Мизеса в различных зонах титано-стального композиционного материала на различных стадиях прокатки при прохождении 6 пар валков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трыков, Ю. П. Титаностальные композиты и соединения: монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун // ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – 344 с.
2. Гуревич, Л. М. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия: монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва : Metallurgizdat, 2016. – 346 с.
3. Трыков, Ю. П. Диффузия в слоистых композитах: монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова // ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 402 с.
4. Исследование структуры и свойств пятислойного титано-стального сваренного взрывом композиционного материала после технологических переделов (Investigation of the structure and properties of a five-layer titanium-steel explosion-welded composite material after technological stages) / Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова, А. Ф. Трудов, В. О. Харламов // Черные металлы (Chernye Metally). – 2022. – № 8. – С. 53–59.
5. Исследование диффузионных процессов в многослойном титано-стальном композите при длительных нагревах / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, В. О. Харламов, Д. Д. Твердышева // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (257) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – («Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 14–21.
6. Формирование фазового состава в зоне соединения слоев сваренного взрывом титано-стального композита после термообработки / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, В. О. Харламов, А. И. Богданов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (273) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – («Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 22–26.
7. Исследование диффузионных процессов в многослойном титано-стальном композите при длительных нагревах / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, В. О. Харламов, Д. Д. Твердышева // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (257) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – («Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 14–21.
8. Формирование многослойного титано-стального интерметаллидного композита / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, В. О. Харламов, Д. Д. Твердышева, В. А. Изюмский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (241) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – («Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 6–14.
9. Structure formation in the zones of joints obtained by explosion welding with subsequent rolling of a five-layer titanium-steel composite / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, А. Г. Серов, В. О. Харламов // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63, No. 1–2 (April). – P. 96–104.
10. Влияние термической обработки на диффузионные процессы в сваренном взрывом пятислойном титаностальном композите / В. Н. Арисова, Л. М. Гуревич, А. Ф. Трудов, А. И. Богданов, В. О. Харламов, В. А. Изюмский // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (233) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – («Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–12.
11. Johnson G. R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th Int. Symp. on Ballistics. – 1983. – P. 541–547.