УДК: 621.791: 519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-6-241-62-67

Л. М. Гуревич, В. Н. Арисова, В. А. Изюмский

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ ПЯТИСЛОЙНОГО ТИТАНОСТАЛЬНОГО КОМПОЗИТА
ПОСЛЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

С использованием экспериментальных данных проведена верификация вариантов 3D-моделирования при горячей прокатке пятислойного титаностального композита, базирующихся на вариационных принципах механики сплошных сред и методе конечных элементов.

Ключевые слова: титан, сталь, слоистые композиты, прокатка, деформация, моделирование, прогнозирование.

© Гуревич Л. М., Арисова В. Н., Изюмский В. А., 2020.

L. M. Gurevich, V. N. Arisova, V. A. Izyumsky

SIMULATION OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF THE EXPLOSION-WELDING FIVE LAYERS TITANO-STEEL COMPOSITE AFTER HOT ROLLING

Volgograd State Technical University

Using experimental data, 3D modeling options were verified, which describe the strain during rolling of layers of a titanium-steel composite and based on the variational principles of continuum mechanics and the finite element method.

Keywords: titanium, steel, layered composites, rolling, deformation, forecasting.

На протяжении многих лет ведутся работы по изучению процессов деформирования композитов с сильно различающимися свойствами [1–3]. Благодаря техническому прогрессу и большому скачку в области компьютерных технологий стало возможным моделирование процессов деформирования анизотропных композитных материалов с целью изучения их поведения, а также прогнозирования конечных свойств без значительных финансовых и материальных затрат.

Неравномерность деформации слоистых композитов при прокатке, зависящая от соотношения сопротивлений деформации его составляющих, толщин и расположения слоев, параметров очага деформации, сил трения между валками и поверхностью композита, напряжений на границах соединения слоев, нарушает соотношение толщин слоев и приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут вызывать изгиб, расслоение и разрыв по границам соединения или внутри хрупких слоев.

Целью настоящей работы являлось выяснение возможностей использования моделей, полученных с использованием метода конечных элементов, для прогнозирования деформации слоев при прокатке пятислойного титаностального композита ВТ-20+08Х18Н10Т из трех титановых (1,2 мм) и двух стальных (1 мм) слоев, полученных сваркой взрывом и подвергнутых отжига для снятия упрочнения околошовных зон. Прочная связь между слоями, характерная для заготовок, полученных сваркой взрывом, препятствует взаимному смещению частиц металла на границе раздела слоев и оказывает существенное влияние на характер напряженно-деформированного состояния. Деформация в таких заготовках более равномерная, чем при отсутствии межслойной связи, но различия в деформации мягкого и твердого слоев могут

приводить к изгибу биметалла и накоплению напряжений вблизи линии соединения. При создании условий, препятствующих изгибу, неравномерность деформации проявляется в виде наплывов мягкого слоя на краевых частях полосы, идущих в отходы.

Для 3D-моделирования процессов прокатки пятислойного титано-стального композита применили программный комплекс SIMULIA/Abaqus, предназначенный для конечно-элементных прочностных расчетов и содержащий модуль Abaqus/Explicit, использующий явную 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 титаностального композита после прокатки при температурах 800, 850 и 900 °С, аналогично представленным в [4]. При задании расчетных схем материала слоев использовали модель пластичности Джонсона–Кука (коэффициенты представлены в таблице), позволяющей учитывать изменение предела текучести как за счет изменения величины деформации, так и температуры [5]:

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

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; $\dot{\varepsilon}_0$ и $\dot{\varepsilon}_p$ – первые производные по времени величин ε_0 и ε_p .

Таблица 1

Использованные коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука

Материал	Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука [5]					
	A, МПа	B, МПа	m	n	T _m , К	T _r , К
Сталь 08X18H10T	280	1215	0.61	0.517	1773	273
Титановый сплав BT-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 экспериментальной прокатки по аналогии с [6]. 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. Коэффициент трения между вращающимися с угловой скоростью 20 радиан/с валками и поверхностями полосы слоистого

композита в соответствии с [1] 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.

Проведенное моделирование показало изменение распределения деформации в различных зонах титаностального композиционного материала. Рассчитанные с помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus по 3D-модели относительные деформации пятислойного композиционного материала на различных стадиях прокатки приведены на рис. 2 и 3. Деформация слоев композита из стали 12X18H10T несколько выше, чем из титанового сплава. Изменение температуры прокатки практически не изменили соотношения высотной деформации слоев.

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

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

Таблица 2

Рис. 2. Высотная деформация слоев после 1-й пары валков при различных температурах прокатки: а – 800 °C; б – 850 °C; в – 900 °C

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. 4). При температуре про-

катки 800 °С и общем высотном обжатии СКМ до 69 % обжатие обладающих меньшим сопротивлением пластическому деформированию слоев коррозионностойкой стали возростала до 73 % при обжатии титанового сплава не более 67 %. При температуре прокатки 900 °С различия в обжатии слоев еще больше возрастают.

Рис. 3. Высотная деформация слоев после 5-й пары валков при различных температурах прокатки: а – 800 °С; б – 850 °С; в – 900 °С

Рис. 4. Зависимость обжатия слоев от общего обжатия композита: а – 800 °С; б – 900 °С; 1 – VT-20; 2 – 08X18N10T

При прохождении композиционного материала через очаг деформации слои титана вовлекаются в деформацию последовательно от прилегающих к зоне контакта с валком до глубинных, которые испытывают сдерживающее воздействие труднодеформируемых стальных слоев.

На рис. 6 представлены изменения распределения напряжений Мизеса в титаностального

композите в процессе прокатки по данным моделирования с помощью пакета SIMULIA/Abaqus при прохождении через 1-ю и 5-ю пары валков. Повышение температуры прокатки практически не приводило к снижению эквивалентных напряжений Мизеса. Во многом это объясняется тем, что при моделировании не учитывали протекание процессов рекристаллизации, которые должны ускоряться с ростом температуры.

Рис. 5. Деформация слоев вдоль оси композита при температуре прокатки 800 °С:
а – 1-я пара валков; б – 2-я пара валков

При прохождении первой пары валков в композите максимальные напряжения Мизеса составили в титановом слое ВТ-20 около 600 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 по-

степенное их сближение с напряжениями в стальном слое, что объясняется с высокой склонностью аустенитных сталей к повышению прочностных характеристик в процессе наклепа. При прохождении 5-й пары напряжения в слое титанового сплава достигали почти 700 МПа, а в слое стали около 500 МПа.

Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в композите при прохождении 1-й пары валков при температурах прокатки:
а – 800 °С; б – 900 °С

Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в композите при прохождении 5-й пары валков при температурах прокатки:
а – 800 °С; б – 900 °С

Вывод

Проведено моделирование процесса прокатки пятислойного титаностального композита ВТ-20+08Х18Н10Т, показавшее, что изменение температуры прокатки в исследованных параметрах не позволяет достичь равномерного распределения напряжений и деформаций после прохождения шести пар валков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Король, В. К.* Основы технологии производства многослойных металлов / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. – М. : Metallurgiya, 1970. – 237 с.
2. *Голованенко, С. А.* Сварка прокаткой биметаллов / А. С. Голованенко. – М. : Metallurgiya, 1977. – 158 с.
3. *Голованенко, С. А.* Производство биметаллов /

С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. – М. : Metallurgiya. 1966. – 404 с.

4. 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. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–12.

5. *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.

6. *Гуревич, Л. М.* Исследование неравномерности деформации при прокатке биметалла титан-алюминий / Л. М. Гуревич, В. М. Волчков, Ю. П. Трыков, О. С. Киселев, А. И. Богданов // Производство проката. – 2013. – № 8. – С. 26–30.