УДК 621.791

DOI:10.35211/1990-5297-2021-10-257-49-59

Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, В. Г. Шморгун, С. А. Кузнецов, С. П. Писарев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ БИМЕТАЛЛА ТИТАН ВТ1-0 + СТАЛЬ 08кп
ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКОЙ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

Проведено исследование методом 3D-моделирования методом конечных элементов различий в деформациях слоев композита титан ВТ1-0 + сталь 08кп за счет боковых и продольных течений металла при варьировании диаметра прокатных валков и геометрии композита, а также верификация результатов 3D-моделирования прокатки сваренного взрывом титано-стального биметалла титан ВТ1-0 + сталь 08кп с использованием экспериментальных данных.

Ключевые слова: титан, сталь, сварка взрывом, биметалл, прокатка, деформация, моделирование, прогнозирование, метод конечных элементов.

© Гуревич Л. М., Слаутин О. В., Шморгун В. Г., Кузнецов С. А., Писарев. С. П., 2021.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0637-2020-0006.

L. M. Gurevich, O. V. Slautin, V. G. Shmorgun, S. A. Kuznetsov, S. P. Pisarev

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A BIMETAL WELDED BY EXPLOSION TITANIUM VT1-0 + STEEL 08kp DURING DEFORMATION BY HOT ROLLING

Volgograd State Technical University

A study of the differences in the deformations of the layers of the composite titanium VT1-0 + steel 08kp due to lateral and longitudinal metal flows with varying the diameter of the rolling rolls and the geometry of the composite, as well as verification of the results of 3D modeling of rolling of the explosion-welded titanium-steel bimetal titanium VT1-0 + steel 08kp using experimental data, was carried out.

Keywords: titanium, steel, explosion welding, bimetal, rolling, deformation, modeling, forecasting, finite element method.

Введение

Биметаллы системы титан-железо широко применяются в химической, нефтеперерабатывающей и атомной промышленности [1–3]. Наиболее качественные титано-стальные соединения получают с помощью сварки взрывом (СВ), т. к. в сваренных на оптимальных режимах биметаллах отсутствуют хрупкие фазы и реализуется равнопрочность основному металлу [4]. В последующем, для получения качественных титано-стальных тонколистовых слоистых композиционных материалов (СКМ) и устранения микродефектов, образовавшихся при СВ, а также при разработке и создании нового класса конструкционных материалов – слоистых металл-интерметаллидных композитов (СМИК) [1–3, 5], применяются различные виды обработки давлением, в частности – холодная (ХП) и горячая (ГП) прокатка [6–8].

Известно, что при прокатке многослойных композитов с различиями механических свойств слоев в большей степени должен деформироваться металл с меньшим сопротивлением деформации, а это в свою очередь приводит к неравенству длин дуг захвата, давлений и крутящих моментов на верхнем и нижнем валках. При разработке методик расчета процессов пластической деформации при прокатке многослойных тел обычно применяют допущения, упрощающие модель процесса и позволяющие получить аналитические зависимости для оценки влияния основных технологических параметров.

Неравномерность деформации слоев композитов при прокатке зависит от соотношения их сопротивлений деформации, исходных толщин и порядка укладки слоев, параметров очага деформации, а также от касательных напряжений на границах соединения [9–11]. Неравномерность деформации оказывает отрицательное влияние на процесс прокатки и свойства биметалла, так как приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут

привести к расслоению биметалла, его изгибу, короблению, разрыву более твердых слоев.

При прокатке асимметричных биметаллов в мягком слое появляются дополнительные напряжения сжатия на границе соединения, а в твердых – напряжения растяжения. В результате воздействия валков с приконтактными поверхностями слоев биметалла, в них возникают сжимающие напряжения. Мягкий слой биметалла подвергается действию сжимающих напряжений как со стороны твердого слоя, так и валков, что затрудняет деформацию мягкого слоя. В твердом слое возникают как сжимающие напряжения со стороны валков, так и растягивающие – со стороны мягкого слоя, что облегчает его деформацию, а следовательно, несколько выравниваются послойные деформации по сравнению со случаем независимой деформации [12].

Зависимость относительной деформации биметалла от основных параметров процесса имеет вид:

$$\varepsilon_T/\varepsilon = f\left(\sigma_T/\sigma_M; H_T/H; L/H_{cp}; \tau; \varphi\right), \quad (1)$$

где H и H_T – начальная толщина биметалла и его твердого слоя соответственно; σ_T и σ_M – величины, характеризующие сопротивление деформации металлов твердого и мягкого слоев соответственно; L/H_{cp} – параметры очага деформации; τ – величина, характеризующая прочность соединения слоев; φ – параметр, характеризующий расположение слоев в биметаллической заготовке.

Прочная связь между слоями полученных сваркой взрывом заготовок препятствует взаимному смещению слоев на границе раздела, что существенно влияет на характер деформированного состояния. Различия в деформации мягкого и твердого слоев приводит к изгибу биметалла, а при наличии условий, препятствующих изгибу, неравномерность деформации проявляется в виде наплывов мягкого слоя на краевых частях полосы, идущих в отходы [13].

При установившемся процессе прокатки биметалла с прочным сцеплением слоев неравномерность деформации наблюдается только в поперечном направлении и почти полностью отсутствует (при невозможности изгиба направлении полосы) в продольном. При разработке технологического процесса получения прокаткой биметаллических листов с предварительным сцеплением слоев необходимо проводить расчет послойных деформаций в зависи-

мости от параметров процесса прокатки. В прошлом веке для моделирования деформации слоев в слоистых композитах успешно применяли энергетические и вариационные принципы механики сплошных сред [14]. Так С. А. Голованенко и Л. В. Меандровым [15] при рассмотрении деформирования слоев биметалла с прочной связью с учетом трения на плоскости контакта металла с инструментом получено следующее уравнение:

$$\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon} = \frac{0,535 + C^2 + (0,534B^7 + B^5C^5)(A-1) + 0,09aC(3-A)(1-B^3)}{0,535 + C^2 + (0,95B^7C^7 - 0,832B^4 + 0,416B)(A-1)}, \quad (2)$$

где $A = \sigma_r/\sigma_m$; $B = H_r/H$; $C = L/H$; a – параметр, характеризующий величину удельных сил трения на контакте с инструментом. Хорошая корреляция между расчетными и экспериментальными зависимостями неравномерности деформации от параметров A , B и C показывает возможность использования полученного выражения для практических расчетов неравномерности деформации биметаллов с прочным сцеплением слоев.

Интенсивное развитие компьютерных пакетов программ конечно-элементного анализа, например, ANSYS (компания ANSYS Inc., США), T-FLEX Анализ (компания «Топ Системы», Россия), Simulia/ABAQUS (Dassault Systemes) позволяют с высокой степенью точности и в приемлемые сроки моделировать процессы прокатки многослойных композитов с учетом изменения деформационной способности слоев из-за наклепа [16–19].

Ранее проведенная успешная верификация упруго-пластической модели с повышающими-

ся пределами текучести $\sigma_{0,2}$ при росте пластической деформации слоев и алгоритмов расчетов, положенных в основу программного комплекса SIMULIA/Abaqus [17–19], позволила использовать их для выявления влияния технологических параметров при моделировании процесса прокатки титаностального композита.

Целью настоящей статьи являлось исследование различий в деформациях слоев композита титан BT1-0 + сталь 08кп за счет боковых и продольных течений металла при варьировании диаметра прокатных валков и геометрии композита.

Материалы и методы исследования

В трехмерной моделях прокатки (рис. 1) вращающиеся с заданной угловой скоростью валки принимались абсолютно жесткими с фиксированным положением осей, расстояние между которыми соответствовало обжатию композита на различных проходах экспериментальной прокатки.

Рис. 1. Трехмерная схема моделирования прокатки композита титан BT1-0 + сталь 08кп с помощью программного комплекса SIMULIA/Abaqus

Образец проходил через четыре последовательно установленных пар валков, что позволя-

ло учитывать изменение свойств слоев композита и их обжатий на каждом этапе моделируе-

мой прокатки. Коэффициент трения между вращающимися с угловой скоростью 2π радиан/с валками и поверхностями полосы слоистого композита в соответствии с [12] принимали $f = 0,2$. Диаметры прокатных валков изменяли от 75 до 200 мм. Перемещение полосы производилось за счет сил трения и под действием используемого в прокатных станах натяжения. В граничных условиях были запрещены перемещения переднего торца прокатываемой полосы в вертикальном направлении. Это позволяло получить практически прямолинейный

прокат после прохождения каждой пары валков, но на входе в зазор прокат мог свободно изгибаться из-за разности деформационной способности слоев. Использовался биметаллический композит (с моделируемой исходной толщиной слоев сталь 08кп – 5 мм, титана BT1-0 – 4,0 мм), что соответствовало использованному в реальных экспериментах прокатным образцам. Для варьирования условий продольного и бокового течения изменяли соотношение исходной ширины композита (табл. 1).

Таблица 1

Варианты использованных условий моделирования

Номер модели	Диаметр вала, мм	Исходные размеры, мм		
		длина	ширина	толщина
1	200	150	30	9
2	200	150	60	9

Величины зазоров в каждой паре валков приведены в табл. 2. При задании расчетных схем материалы слоев использовали модель

пластичности данные [20], позволяющей учитывать изменение предела текучести при различных величинах деформации (рис. 2).

Таблица 2

Зазоры в каждой паре валков прокатного стана

Параметр прокатки	Номер пары валков			
	1	2	3	4
Зазор, мм	7,2	6,35	5,45	4,5
Относительное обжатие, %	20	30	40	50

Рис. 2. Зависимость предела текучести титан BT1-0 (1) и стали 08кп (2) от степени пластической деформации

Для верификации результатов проводили исследование на образцах биметалла титан BT1-0 + сталь 08кп с исходными толщинами слоев 5,0 и 4,0 мм соответственно, полученных сваркой взрывом по параллельной схеме на режиме (скорость детонации взрывчатого вещества 2900–2950 м/с, скорость соударения 650–670 м/с), обеспечившем при разрывных испытаниях нормально границе соединения стабильное разрушение композиционных образцов при напряжениях 360–500 МПа. Наличие высокотвердых оплавок на межслойных границах не превышало $\approx 5\%$ от общей протяженности границы соединения (рис. 3).

Последующая прокатка биметаллических композитов производилась на двухвалковом прокатном стане ДУО до толщины $1 \pm 0,05$ мм с обжатием за один проход 8–12 %. После каждого прохода производился отбор образцов для определения послойных деформаций слоев и композита в целом.

Рис. 3. Микроструктура зоны соединения титан BT1-0 + сталь 08 кп после сварки взрывом ($\times 200$)

Температура прокатки (700 и 800 °С) была выбрана меньше температуры полиморфного превращения в титане, так как нагрев композита до температуры, превышающей температуру $\alpha \rightarrow \beta$ превращения в титане, сопровождается уменьшением его объема на 5,5 %, а температурный коэффициент линейного расширения титана при 900–1000 °С в 2,5 раза меньше, чем стали. Кроме того, полиморфное превращение сопровождается изменением пластичности титана. Выбранные температуры превышают порог начала рекристаллизации компонентов биметалла, определенные по правилу А. А. Боч-

вара (≈ 500 °С для технически чистого титана и ≈ 630 °С для нелегированных низкоуглеродистых сталей), на 100–200°, что практически исключает возможность протекания рекристаллизационных процессов за короткий временной интервал прокатки.

Результаты исследований и их обсуждение

В качестве базового варианта при моделировании была выбрана модель № 1. По результатам моделирования было получено распределение высотной и продольной деформации вдоль вертикальной оси образца (рис. 4). Как видно из рис. 4 распределение высотной и продольной деформаций в титане практически постоянно от наружной поверхности к границе раздела, а в стальной пластине максимальные по величине деформации обнаруживаются вблизи наружной поверхности пластины.

Визуализация изменения распределения деформации вдоль оси Z (в поперечном направлении) на наружной поверхности стальной пластины показано на рис. 5. Максимальные поперечные деформации наблюдаются в стальной пластине наблюдаются в осевой зоне, которые уменьшаются к боковым краям пластины, а также на заходном и выходном участках.

Рис. 4. Распределение продольной (а) и высотной деформации (б) вдоль вертикальной оси образца шириной 30 мм при последовательном прохождении четырех пар валков (см. также с. 54)

Рис. 4. Окончание

Рис. 5. Изменение распределения деформации в поперечном направлении на наружной поверхности стальной пластины исходной шириной 30 мм после прохождения:
 а – первой пары валков; б – второй пары; в – третьей пары; г – четвертой пары

Близкая картина визуализации поперечных деформаций наблюдается и на наружной поверхности титана (рис. 6), однако у титанового слоя величины деформации в осевой зоне и вблизи боковых краев отличаются незначительно.

Увеличение ширины прокатываемой пластины до 60 мм заметно затрудняет уширение пластины при прокатке при прохождении каждого из четырех зазоров между валками (рис. 7).

В отличие от прокатки пластин шириной 30 мм, в этом случае поперечные деформации

значительно ниже, и отсутствует зона повышенных деформаций в осевой части пластины. Наоборот, максимальные поперечные деформации локализуются вблизи боковых краев пластины.

Как видно из рис. 8 увеличение ширины слоистого композита резко изменило распределение высотной и продольной деформаций в стали и в титане по сравнению с аналогичными характеристиками в образце шириной 30 мм (рис. 5). Суммарные обжатия слоев обоих вариантов композита после прохождения каждой пары валков приведены в табл. 3.

Таблица 3

Суммарные обжатия слоев титана BT1-0 и стали 08 кп

Материал слоя	Ширина пластины, мм	Величина обжатия после каждой пары валков, %			
		пара № 1	пара № 2	пара № 3	пара № 4
BT1-0	30	18,57	29,74	38,66	49,48
Сталь 08кп	30	20,66	31,57	40,10	48,98
BT1-0	60	19,83	31,06	39,68	50,02
Сталь 08кп	60	19,77	30,61	39,73	49,47

Рис. 6. Изменение распределения деформации в поперечном направлении на наружной поверхности титановой пластины исходной шириной 30 мм после прохождения: а – первой пары валков; б – второй пары; в – третьей пары; г – четвертой пары

Рис. 7. Изменение распределения деформации в поперечном направлении на наружной поверхности стальной пластины исходной шириной 60 мм после прохождения: *a* – первой пары валков; *б* – второй пары; *в* – третьей пары; *г* – четвертой пары

Рис. 8. Распределение продольной (а) и высотной деформации (б) вдоль вертикальной оси образца шириной 60 мм при последовательном прохождении четырех пар валков

При проведенной верификации установлено, что при ГП, наблюдалась некоторая неравномерность деформации титановых и стальных слоев. Однако расслоений по межслойным границам или разрушений образцов, прокатанных при температуре 700 (800) °С с обжатием до 74 % включительно, не наблюдалось (рис. 9). Так, различие в исходных прочностных характери-

стиков слоев приводит к нарушению соотношений толщин слоев в результате деформации при малых степенях обжатия композита в целом. Например, при степени $\varepsilon = 55\%$, обжатие BT1-0 и стали 08кп составляло соответственно 32 и 57 %. Увеличение обжатия до 72 % привело к практически равномерной деформации как стального, так и титанового слоев (рис. 9).

Рис. 9. Поперечная деформация титановых и стальных слоев при горячей прокатке (1, 3 – 700 °C; 2, 4 – 800 °C) с различными степенями обжатия: 1, 2 – ВТ1-0; 3, 4 – 08 кп

Выводы

1. Продольная деформация в стальной и титановой пластинах при прохождении первой пары валков практически постоянна по толщине, при прохождении последующих валков за счет сил трения о поверхности валков продольная деформация приповерхностных слоев опережает деформацию слоев вблизи поверхности раздела.
2. Характер распределения высотной деформации в центральной зоне пластины практически одинаков для стальной и титановых пластин.
3. Результаты экспериментов по прокатке образцов биметалла титан ВТ1-0 + сталь 08кп с исходными толщинами слоев 5,0 и 4,0 мм, полученных сваркой взрывом по параллельной схеме, имели хорошую корреляцию с результатами моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трыков, Ю. П. Титан-сталь: от биметалла до интерметаллидных композитов / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгунов, Л. М. Гуревич // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. – 2008. – Т. 2. – №. 10. – С. 5-14.
2. Трыков, Ю. П. Титаностальные композиты и соединения: монография / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов. – Волгоград, ВолГТУ. – 2013. 344 с.
3. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия: монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва: Metallurgizdat, 2016. – 346 с.
4. Седых, В. С. Особенности микронеоднородности сваренных взрывом соединений / В. С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: сб. науч. тр. – Волгоград, ВПИ. – 1975. – С. 3-39.
5. Шморгунов, В. Г. Комплексные технологические процессы получения слоистых интерметаллидных композитов / В. Г. Шморгунов, Ю. П. Трыков, О. В. Слаутин // Конструкции из композиционных материалов. – 2005. – № 3. – С. 3-9.
6. Обработка металлов давлением / Н. А. Карнаушенко, М. И. Капустина, А. Я. Коротева [и др.]. – М.: Металлургия, 1969. – 163 с.
7. Сидоров, И. И. Биметалл титан-сталь, полученный сваркой взрывом, и его применение / И. И. Сидоров, А. М. Тынтарев, Э. Ф. Кирилин // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3. – С. 276-292.
8. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1978. – 168 с.
9. Ляшков, В. Б. Исследование контактных напряжений при прокатке биметалла с натяжением / В. Б. Ляшков, В. К. Никифоров, П. Ф. Засуха // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1976. – № 4. – С. 116-119.
10. Биметаллический прокат / П. Ф. Засуха, В. Д. Коршиков, О. Б. Бухвалов, А. А. Ершов. – М.: Металлургия, 1970. – 263 с.
11. Король, В. К. Особенности моделирования процесса прокатки слоистых материалов. Перспективные технологии легких и специальных сплавов (к 100-летию со дня рождения академика А. Ф. Белова). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 432 с.
12. Король, В. К. Основы технологии производства многослойных металлов / В. К. Король, М. С. Гиндельгорн. – М.: Металлургия, 1970. – 237 с.
13. Трыков, Ю. П. Деформация слоистых композитов: монография / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгунов, Л. М. Гуревич; ВолГТУ. – Волгоград: РПК "Политехник", 2001. – 241 с.
14. Тарновский, И. Я. Вариационные методы механики пластических сред в теории обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский. – Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. – М.: Metallurgizdat, 1963. – С. 45-72.

15. Голованенко, С. А. Производство биметаллов / С. А. Голованенко, Л. В. Меандров. – М.: Металлургия, 1966. – 404 с.
16. Смирнов, С. В. Сравнительная оценка поврежденности металла на свободной боковой поверхности при прокатке однослойных и трехслойных полос / С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. Issue 4, 2015. – С. 7.
17. Гуревич, Л. М. Моделирование процессов деформирования слоистых титаноалюминиевых композитов в процессе изгиба / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, В. М. Волчков, О. С. Киселев, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(96) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2012. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»; вып. 6). – С. 11–15.
18. 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. 24–28.
19. Двух- и трехмерное моделирование процесса прокатки слоистых никель-алюминиевых композитов / Л. М. Гуревич, В. М. Волчков, О. С. Киселев, В. Ф. Даненко // *Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 15 (118) / ВолгГТУ*. – Волгоград, 2013. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»; вып. 8). – С. 26–29.
20. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.