

УДК 62-419.5: 620.172.224:519.876.5

Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, Е.В. Соколова, Р.Е. Новиков, А.А. Загребина

Волгоградский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СВАРЕННЫХ ВЗРЫВОМ ЧЕТЫРЕХСЛОЙНЫХ ТИТАНО-СТАЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ*

Развитие энергетики, ракетно-космической и криогенной техники требует разработки технологий получения титано-стальных композитов с гарантированными служебными свойствами в условиях высоких давлений, нагрузок, низких и повышенных температур. Традиционные способы сварки (плавлением или прокаткой) сопровождаются нагревом границы раздела металлов до температур, приводящих к образованию интерметаллидов и карбидов титана и в результате к резкому падению прочности и пластичности слоистых композиционных материалов. При оптимальных режимах быстротечного процесса сварки взрывом не развиваются диффузионные процессы, и в полученных титано-стальных композитах отсутствуют хрупкие включения. Однако при последующих эксплуатационных нагревах свыше 600 °С возможно возникновение на границе раздела металлов интерметаллидных прослоек, поэтому для таких титано-стальных конструкций целесообразно использование композитов с промежуточными прослойками между титаном и сталью, исключающих или уменьшающих интенсивность диффузионных процессов [1, 2].

Введение медно-ниобиевой прослойки в титано-стальную композицию ОТ4-1 (BT1, BT6C)+Nb+Cu+2X18H10T расширяет оптимальный диапазон сварки и обеспечивает высокую стабильность механических свойств соединения после сварки взрывом и последующих кратковременных (до нескольких часов) нагревов до 1000 °С по сравнению с допустимыми 500 – 600 °С для биметалла ОТ4-1+12X18H10T. Оплавленные участки в таких соединениях обладают удовлетворительной пластичностью и имеют сравнительно низкую микротвердость (2,0 – 2,5 ГПа соединение Nb+Cu; 2,0 – 2,3 ГПа сталь 12X18H10T+Nb; 1,8 – 2,0 ГПа соединение сталь Ст3+Cu). Введение мягких прослоек должно снижать прочность композита. Однако при уменьшении толщин Cu (или медных сплавов) и Nb (кото-

рые обычно характеризуют относительной толщиной $\chi = h/d$, где h – толщина прослойки, d – диаметр испытываемого образца) из-за реализации эффекта контактного упрочнения при нагружении [3] обеспечивается равнопрочность соединения основному металлу (титану или стали) и за счет вовлечения последнего в пластическую деформацию значительно повышается деформационная способность соединения в целом. Для расчета прочности сваренных взрывом композиционных материалов с мягкими прослойками разработаны расчетно-графические методы, учитывающие соотношение прочностных характеристик (пределов прочности и текучести) составляющих композита [4]. В последние годы повышение вычислительных возможностей компьютерной техники позволило для моделирования поведения многослойных композитов использовать пакеты компьютерных программ, основанных на методе конечных элементов.

Целью настоящей работы была проверка возможности моделирования методом конечных элементов поведения четырехслойного титано-стального композиционного материала с мягкой прослойкой в условиях растяжения при нормальной температуре и 300 °С. Для верификации модели использовались ранее полученные результаты испытания образцов титано-стального композита при нормальной температуре [5].

Возможность моделирования процессов растяжения цилиндрического образца диам. 6 мм четырехслойного титано-стального композита BT6+ниобий BH2+медь M1+сталь 12X18H10T методом конечных элементов проверялась с использованием модуля Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Abaqus, Inc. (USA), использующего явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Расчет проводился с использованием модели Мизеса. Прочность связей между слоями соответствовала прочности менее прочного элемента пары. Размер стороны кубической ячейки конечно-элементной сетки в сплаве BT6 и стали

* Исследование выполнено за счет гранта научного фонда (проект № 14 – 19 – 00418).

12X18H10T выбирался равным 0,04 мм, что обеспечивало достаточную точность и приемлемое время проведения расчетов. В прослойках ниобия ВН2 и меди М1 размер ячейки в радиальном направлении выбирался 0,04 мм, а толщина принималась равной 40 ячейкам. Для сокращения времени моделирования использовалась осевая симметрия цилиндрического тела и рассчитывались деформации в радиальном сечении. Толщина прослойки меди варьировалась от 6 ($\chi_{Cu} = 0,25$) до 0,3 мм ($\chi_{Cu} = 0,05$) при толщине ниобия 0,6 мм ($\chi_{Nb} = 0,1$).

Для расчета упрочнения материалов в результате пластического деформирования использовали для ниобия кривую упрочняемости при различных температурах [6], а для других материалов модель Джонсона–Кука [7], согласно которой предел текучести можно определить по формуле

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

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

Эта формула по сути представляет собой семейство кривых деформирования материала при различных температурах и скоростях деформирования. Значения параметров для выбранных материалов приведены в таблице. В связи с низкой скоростью деформирования ($\dot{\epsilon}_p$ менее $0,0025 \text{ с}^{-1}$) ее влияние не учитывалось.

Моделируемая скорость растяжения образца 0,01 мм/с.

Проведенное моделирование показало изменение характера деформирования и формирования напряжений Мизеса в основных слоях композиции при варьировании относительной толщины мягкой прослойки (рис. 1). При нормальной температуре и деформации образца 5 % максимальные напряжения Мизеса наблюдались в титановом сплаве вблизи линии соединения с ниобием. Увеличение толщины мягкой прослойки меди приводило к ее преимущественной деформации при одной и той же суммарной деформации образца и снижению напряжений в слоях титана и стали. Увеличение температуры моделирования до 300°C вызывало снижение напряжений при той же величине деформации образца. При малых толщинах медной прослойки (0,3 и 0,6 мм) в деформацию активно вовлекается слой стали.

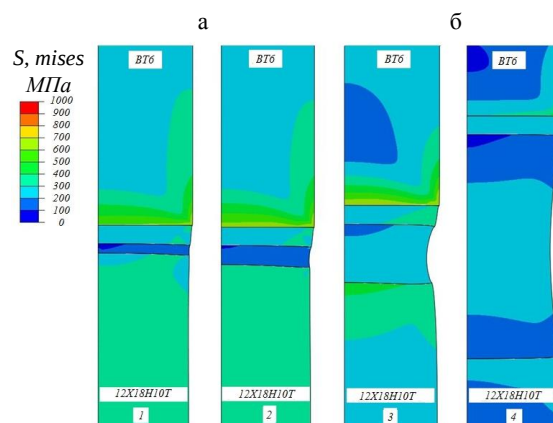


Рис. 1. Изменение характера распределения напряжений Мизеса в основных слоях и мягких прослойках в композите BT6+ВН2+М1+12X18H10T (осевая суммарная деформация 5 %) при температурах 20°C (а) и 300°C (б) при варьировании χ_{Cu} :
1 – $\chi_{Cu} = 0,05$; 2 – $\chi_{Cu} = 0,1$; 3 – $\chi_{Cu} = 0,25$; 4 – $\chi_{Cu} = 1,0$

Использованные коэффициенты для модели пластичности Джонсона – Кука

Материал	Коэффициенты для модели пластичности Джонсона – Кука [6]						
	A, МПа	B, МПа	m	n	$\dot{\epsilon}_0$, с^{-1}	T_m , К	T_r , К
Медь [7]	90	292	1,090	0,310	1	1356	293
Сталь 12X18H10T [8]	305	1161	0,517	0,61	1	1773	293
Титановый сплав BT6 [9]	968	380	0,577	0,421	1	1940	293

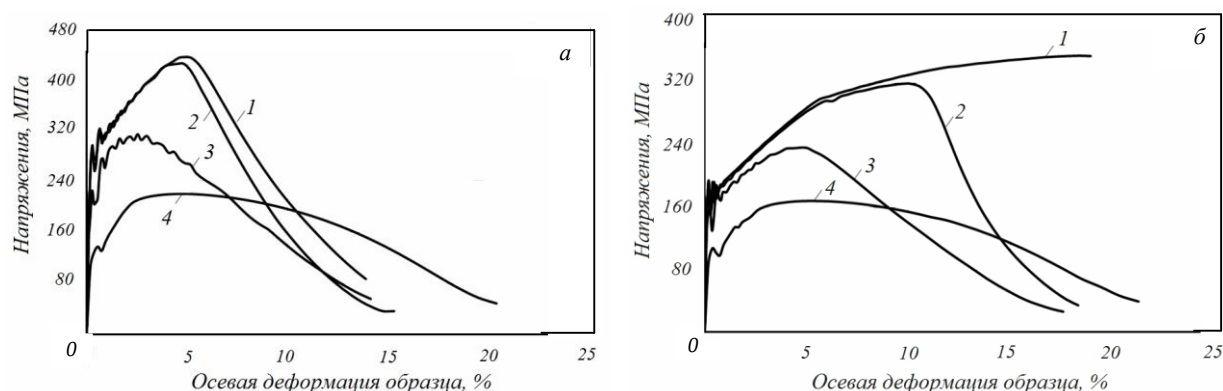


Рис. 2. Расчетные диаграммы растяжения для композита BT6+BN2+M1+12X18H10T при температурах 20 °C (а) и 300 °C (б) для различных χ_{Cu} : 1 – $\chi_{Cu} = 0,05$; 2 – $\chi_{Cu} = 0,1$; 3 – $\chi_{Cu} = 0,25$; 4 – $\chi_{Cu} = 1,0$

Полученные при моделировании кривые напряжения – деформация ($\sigma = f(\epsilon)$) при растяжении композита BT6+BN2+M1+12X18H10T с различными относительными толщинами медной прослойки χ_{Cu} приведены на рис. 2. Уменьшение толщины медной прослойки до 0,3 мм позволяет повысить предел прочности до 435 МПа при комнатной температуре и до 350 МПа при 300 °C.

Зависимость деформации ячеек вдоль оси образцов с относительной толщиной медной прослойки $\chi_{Cu} = 0,05$ от общей деформации составного образца при комнатной температуре и 300 °C показаны на рис. 3. При нормальной температуре основная деформация локализуется в стали 12X18H10T, при повышении температуры преимущественное падение предела текучести меди вызывает деформацию, в основном, медной и ниобиевой прослоек.

Полученные результаты указывают на необходимость тщательного подхода к выбору толщины технологической прослойки меди в четырехслойном композите BT6+BN2+M1+12X18H10T, включая математическое моде-

лирование поведения изделия из композиционного материала при возможных схемах нагружения, для обеспечения необходимого запаса пластичности материала в условиях эксплуатации. Уменьшение толщины медной прослойки до 0,3 мм позволило переносить деформацию на слой стали 12X18H10T при комнатной температуре, но для повышенных температур необходимы меньшие толщины медной прослойки.

Выводы. Методами конечно-элементного моделирования подтверждено, что уменьшение относительной толщины медной прослойки в четырехслойном композите BT6+BN2+M1+12X18H10T приводит к росту его прочности при нормальной температуре с постепенным перемещением локализации пластической деформации с меди M1 (при χ_{Cu} от 1,0 до 0,1) на сталь 12X18H10T (при $\chi_{Cu} = 0,05$). Повышение температуры испытаний до 300 °C приводит к локализации деформации в медной и ниобиевой прослойках даже при $\chi_{Cu} = 0,05$.

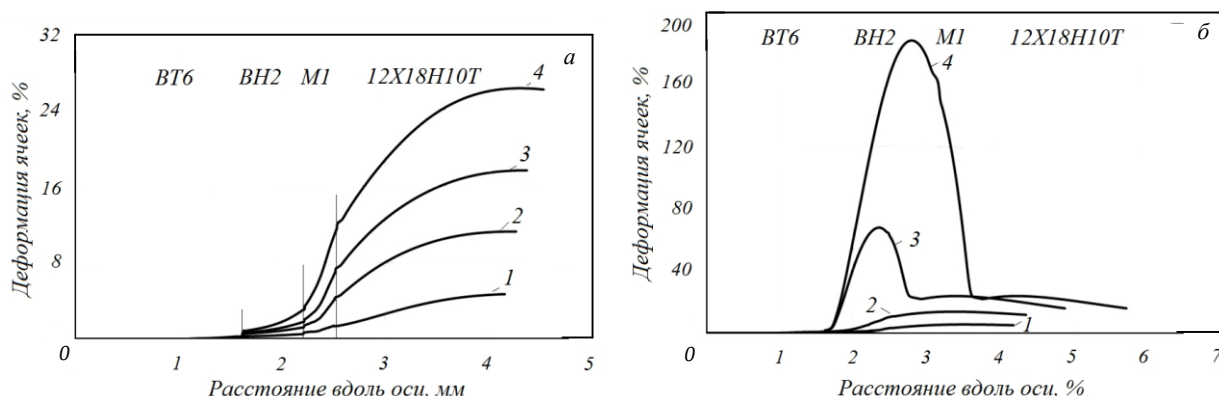


Рис. 3. Расчетная диаграмма распределения деформации ячеек вдоль оси образца в слоях композита BT6+BN2+M1+12X18H10T при температурах 20 °C (а) и 300 °C (б) с относительной толщиной медной прослойки $\chi_{Cu} = 0,05$: 1, 2, 3 и 4 – средняя относительная деформация образца 2, 5, 8 и 11 %

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Шморгунов В.Г. Титано-стальные композиты и соединения. – Волгоград: изд. ВолгГТУ, 2013. – 344 с.
2. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Кусков Ю.Н., Киселев О.С., Богданов А.И. Расчет прочности сваренных взрывом композиционных соединений с механически неоднородными мягкими прослойками // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 3. С. 11 – 14.
3. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Проничев Д.В. Композиционные переходники. – Волгоград: РПК «Политехник», 2007. – 328 с.
4. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Кусков Ю.Н., Самарский Д.С., Киселев О.С., Богданов А.И. Прочность свариваемых взрывом соединений с композитными прослойками // Конструкции из композиционных материалов. 2009. Вып. 4. С. 17 – 25.
5. Трыков Ю.П., Белоусов В.П., Гуревич Л.М., Рогозин В.Д., Писарев С.П. Исследование кинетики деформации и разрушения сваренных взрывом четырехслойных титано-стальных композитов // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 8. С. 31 – 37.
6. Sia Nemat-Nasser, Weiguo Guo. Flow stress of commercially pure niobium over a broad range of temperatures and strain rates // Materials Science and Engineering A284 (2000). Pp. 202 – 210.
7. 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. Pp. 541 – 547.
8. Chandrasekaran R. M'Saoubi H. Chazal, Modelling of material flow stress in chip formation process from orthogonal milling and split Hopkinson bar tests // Machining Science and Technology. (2005). № 9. Pp. 131 – 145.
9. Li L., He N., A FEA study on mechanisms of saw-tooth chip deformation in high speed cutting of Ti-6Al-4V alloy, in: Fifth International Conference on High Speed Machining (HSM), Metz, France, 14–16 March 2006. Pp. 759 – 767.

© 2015 г. Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков,
Е.В. Соколова, Р.Е. Новиков, А.А. Загребина
Поступила 22 июня 2015 г.

УДК 621.745.34:662.87

А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, А.А. Куценко

Сибирский государственный индустриальный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПО КАНАЛАМ СЛОЯ ТОПЛИВА

Пылеугольное топливо в доменном процессе используют уже порядка 50 лет. Практика его применения показала экономическую эффективность такого вида топлива в сравнении с другими заменителями кокса – природного газа и мазута.

В ваграночной плавке пылеугольное топливо не применяют, хотя технология процесса намного проще. С экономической точки зрения проблема использования этого топлива в ваграночном процессе заслуживает внимания

исследователей технологического и теоретического направлений специализации.

Установлено [1], что дисперсные частицы должны сгореть в пределах кислородной зоны для получения максимального теплового эффекта. Угольные частицы, попадая в восстановительную зону, где нет свободного кислорода, механически взаимодействуют со шлаком, изменяют его физико-механические свойства и удаляются из печи вместе с ним.