УДК 620.178.15:519.876.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-42-48

*Л. М. Гуревич, С. П. Писарев, В. Ф. Даненко, В. Або-Шакра***МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В АРМИРОВАННОМ ТИТАНО-АЛЮМИНИЕВОМ КОМПОЗИТЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Изучено влияние размера и расположения волокон в композите с алюминиевой матрицей, армированной титановыми волокнами, на изменение напряженно-деформированного состояния при вдавливании жесткого сферического индентора для определения твердости по методу Бринелля. Моделировался процесс внедрения абсолютно твердого шарика Ø 5 мм под нагрузкой 1226 Н с использованием модели Мизеса в программном комплексе SIMULIA/Abaqus. Показано, что распределение пластической деформации при вдавливании в ячейках вблизи поверхности пластины в осевом сечении не монотонно и характеризуется двумя максимумами и почти полным отсутствием пластической деформации вблизи центра лунки. При расположении индентора над осью титановой проволоки отпечаток приобретает эллиптическую форму с большей осью, нормальной к осям проволок, что связано со сдерживанием деформации алюминия в этом направлении титановыми волокнами.

Ключевые слова: твердость по Бринеллю, индентор, алюминиевая пластина, титановые волокна, деформация, отпечаток, конечно-элементное моделирование.

*L. M. Gurevich, S. P. Pisarev, V. F. Danenko, V. Abo-Shakra***SIMULATY OF VOLUME STRESS-DEFORMED STATE IN A REINFORCED TITANIUM-ALUMINUM COMPOSITE WHEN DETERMINING THE HARDNESS BY BRINELL****Volgograd State Technical University**

The effect of the diametrts and arrangement of titanium fibers in a fibrous composite with an aluminum matrix on the change in the stress-strain state upon indentation of a rigid spherical indenter by the Brinell method has been studied. The process of introducing a hard ball Ø 5 mm under a load of 1226 N was simulated in the SIMULIA / Abaqus software package. The distribution of plastic deformation in the cells near the surface of the deformed plate in the axial section has two maxima and almost zero near the center of the hole. The print becomes elliptical when the indenter is positioned over the axis of the titanium wire. The major axis of the ellipse is perpendicular to the axes of the wires. This is due to the restraint of aluminum deformation in this direction by titanium fibers.

Keywords: Brinell hardness, indenter, aluminum plate, titanium fibers, deformation, indentation, finite element modeling.

Широко используемый для определения свойств различных материалов метод определения твердости по Бринеллю основан на изучении сопротивления пластической деформации материала при внедрении твердого сферического тела в более мягкую пластину. За более чем вековую историю накоплен огромный опыт его использования, показавший хорошую повторяемость результатов, приводимых в технической литературе для различных групп материалов. Результаты определения твердости по Бринеллю используют для расчета других механических свойств однородных материалов, например, предела прочности или предела текучести [1]. Для более полного понимания на-

пряженно-деформированного состояния, формирующегося при вдавливании сферического индентора при испытаниях твердости по методу Бринелля, ряд авторов использовал методы конечно-элементного моделирования. Одной из первых работ в этом направлении являлась статья [2], в которой приведен подробный обзор работ с классическим подходом контактной механики при вдавливании сферического твердого тела в пластичную пластину, так и попыток использования численных решений конкретных задач с использованием методов конечно-элементного моделирования. Уже в 1992 году была сделана попытка использования для решения таких задач пакета программ Abaqus.

© Гуревич Л. М., Писарев С. П., Даненко В. Ф., Або-Шакра В., 2020.

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

Авторы статьи [3] с использованием пакета программ SIMULIA/Abaqus провели верификацию осесимметричной и 3D моделей внедрения твердой сферы в более мягкую пластину при различных вариантах задания зависимости предела текучести деформируемого материала от величины деформации. Зависимость «предел текучести-деформация» деформируемого изотропного материала задавалась указанием коэффициентов модели пластичности Джонсона-Кука [4]. Результаты исследований показали, что при использовании кривой «напряжения Коши – деформация Грина-Лагранжа» получаемые значения твердости несколько выше, чем для кривой «инженерные предел текучести – относительная деформация», но в обоих случаях получаемые результаты моделирования близки к экспериментальным.

В статье [5] проведено моделирование поведения аустенитной коррозионностойкой стали X2CrNi18-9. В использованной 3D конечно-элементной модели для описания зависимости предела текучести σ_T как функции, аппроксимирующей кривую упрочнения для исследуемой стали, применяли также эластопластическую модель Джонсона-Кука, но дополнительно в качестве критерия разрушения вводили модель разрушения Джонсона-Кука [6]. Основные экспериментальные и численные результаты, приведенные в статье, показывают концентрацию напряжений на границе и в центре отпечатков на всем протяжении испытания на вдавливание. По результатам сканирующей электронной микроскопии определялся размер выдавленного сферического отпечатка, который увеличивался с ростом нагрузки. Разработанная численная модель КЭ испытания на вдавливание по Бринеллю показала хорошую корреляцию с результатами экспериментальных испытаний.

Методы конечно-элементного моделирования позволяют оценивать напряженно-деформированное состояние при вдавливании сферического индентора не только в однородный, но и в композиционный материал. Авторы статьи [7] использовали метод Бринелля для оценки степени неоднородности пятислойного композиционного материала - ламинированного напольного покрытия, древесный слой которого может иметь значительную структурно-механическую неоднородность.

В работе [8] была разработана и проверена конечно-элементная модель непрерывного разрушения при низких скоростях внедрении ин-

дентора в слоистые композиты из тканого материала при различных уровнях энергии удара. В качестве критериев верификации модели использовались характеристики остаточных повреждений в поперечном сечении, определенные экспериментально с помощью системы трехмерного сканирования поверхности и рентгеновской компьютерной томографии.

Авторы [9] отметили, что при испытаниях композиционных дисперсноупрочненных материалов расчет механических свойств по определенным значениям твердости приводит к завышению значений предела текучести и предела прочности. Завышение результатов объясняется наблюдением увеличения плотности частиц под индентором. Авторы провели исследование влияния размера, глубины залегания и твердости подповерхностных частиц с помощью компьютерного моделирования.

Аналогичные проблемы по адекватности расчета механических свойств по определенным значениям твердости должны возникать и для волокнистых материалов.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния размера и расположения волокон в волокнистом композите с металлической матрицей на изменение напряженно-деформированного состояния при вдавливании жесткого сферического индентора по методу Бринелля.

Моделирование процесса внедрения абсолютно твердого шарика $\varnothing$ 5 мм под нагрузкой 1226 Н проводилось с использованием модели Мизеса в модуле Abaqus/Explicit программного комплекса SIMULIA/Abaqus компании Dassault Systèmes Simulia Corp. (USA), использующего явную схему интегрирования для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов. Размер сторон квадратных ячеек конечно-элементной сетки для объемной схемы моделирования составлял 0,06 мм. В процессе моделирования записывались кривые изменения величины перемещения сферического индентора во времени, а также изменения реакции абсолютно твердой опоры под деформируемой пластиной алюминия. Внутри алюминиевой пластины в шахматном порядке находились два ряда прочно скрепленных с пластиной титановых проволок из сплава ВТ6, расстояние между центрами которых составляло 2 мм (рис. 1). Исследование упрочнения алюминиевой матрицы волокнами титана представляет достаточный научный интерес, особенно, если учесть, что после использования диффузионных процессов при термической

обработке в твердом состоянии или с формированием расплава алюминия титановые проволоки могут быть полностью или частично переведены в более прочные алюминиды титана [10]. В этом случае будет получен волокнистый металло-интерметаллидный композит, являющийся дальнейшим развитием идей, заложенных при создании класса металло-интерметаллидных слоистых композитов [11].

Рис. 1. Модель определения твердости по Бринеллю алюминиевой пластины, армированной титановыми проволоками: 1 – абсолютно твердый шарик Ø 5 мм; 2 – абсолютно твердая опора; 3 – алюминиевая пластина; 4 – титановые проволоки

Свойства деформируемых изотропных материалов задавались в пакете программ SIMULIA/Abaqus указанием коэффициентов модели пластичности Джонсона–Кука, согласно которой предел текучести можно определить по формуле

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

где ε_p – эффективная пластическая деформация; T_m – температура плавления; T_r – комнатная температура; 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 . И использованные значения коэффициентов модели пластичности Джонсона–Кука для алюминия и титана приведены в табл. 1. Ранее [12, 13] возможность использования таких коэффициентов модели Джонсона–Кука были проверены при различных вариантах деформирования слоистого композита.

Таблица 1

Коэффициенты для модели пластичности Джонсона–Кука

Материал	Коэффициенты для модели пластичности [4]						
	A, МПа	B, МПа	m	n	$\dot{\varepsilon}_0$, сек ⁻¹	T_m , K	T_r , K
Алюминий АД1	60,0	6,4	0,859	0,62	1	933	293
Титановый сплав ВТ6	420,0	52	1,00	0,48	1	1940	293

Был промоделирован ряд вариантов (табл. 2), отличающихся диаметром титановых проволок и двумя крайними вариантами положения оси индентора относительно оси проволок (посре-

дине между осями проволок или над ними). Во всех случаях расстояние между поверхностями алюминиевой пластины и верхней точки проволоки составляло 0,5 мм.

Таблица 2

Параметры вариантов моделирования

Вариант	Диаметр титановой проволоки, мм	Положение индентора относительно проволок	Расстояние между рядами проволок, мм
1	1,0	между осями	1,75
2	1,0	над осью	1,75
3	0,75	между осями	1,75
4	0,75	над осью	1,75
5	0,375	между осями	1,38
6	0,375	над осью	1,38

На рис. 2 представлены профили поверхности отпечатков в деформированной пластине в осевом сечении, нормальном к оси титановых проволок, после завершения процесса деформирования по всем промоделированным вариантам (индентор прижат к поверхности пластин максимальным усилием).

Сравнение профилей поверхности отпечатков в деформированной пластине в осевом сечении, нормальном к оси титановых проволок, представленных на рис. 2, показывает их слабую зависимость от диаметра армирующих

проволок и положения вдавливаемого индентора относительно осей проволок, что в принципе и понятно, так как поверхность образующейся лунки определяется шаровой поверхностью вдавливаемого индентора.

Диаметры полученных лунок практически одинаковы при всех вариантах моделирования, что свидетельствует о близости получаемых значений твердости по Бринеллю. Однако напряженно-деформированное состояние на поверхности отпечатка в значительной степени зависит от конструкции композита (рис. 3).

а

б

Рис. 2. Профили поверхности отпечатков в осевом сечении, нормальном к оси титановых проволок, после завершения процесса деформирования при размещении индентора между осями (а) и над осью (б) титановых проволок:

1–6 – соответственно номера промоделированных вариантов

а

б

Рис. 3. Распределение пластической деформации в ячейках поверхности деформированной пластины в осевом сечении, нормальном к оси титановых проволок, после завершения процесса деформирования при размещении индентора между осями (а) и над осью (б) титановых проволок:

1–6 – соответственно номера промоделированных вариантов

Анализ кривых на рис. 3 показывает, что распределение пластической деформации в ячейках вблизи поверхности деформированной пластины в осевом сечении не монотонно и характеризуется двумя максимумами и почти полным отсутствием пластической деформации вблизи центра лунки. Уменьшение диаметра

армирующей титановой проволоки приводит к снижению уровня пластической деформации в зоне отмеченных максимумов.

Характер распределения напряженно-деформированного состояния по толщине алюминиевой пластины с армирующими титановыми проволоками достаточно сложен (рис. 4 и 5).

Рис. 4. Распределение эквивалентных деформаций по Мизесу по толщине алюминиевой пластины с армирующими титановыми проволоками после завершения процесса деформирования при размещении индентора между осями (*а, б*) и над осью (*в* и *г*) титановых проволок: *а* – вариант 1; *б* – вариант 2; *в* – вариант 5; *г* – вариант 6

Рис. 5. Распределение пластической деформации по толщине алюминиевой пластины с армирующими титановыми проволоками после завершения процесса деформирования при размещении индентора между осями (*а, б*) и над осью (*в* и *г*) титановых проволок: *а* – вариант 1; *б* – вариант 2; *в* – вариант 5; *г* – вариант 6

Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу были зафиксированы в армирующих титановых проволоках, причем уровень напряжений в них возрастал по мере уменьшения диаметра: при диаметре проволок $\varnothing 0,375$ мм повышенный уровень напряжений до 200–240 МПа наблюдался даже в проволоках второго нижнего ряда при обоих вариантах положения центра индентора (между осями проволок и над осью). Протяженность участка проволоки с повышенным уровнем напряжений в случае расположения индентора над осью проволоки выходит далеко за пределы проекции площади вдавленного отпечатка. Достигаемого уровня напряжений в титановых проволоках недостаточно для пластической деформации титана (рис. 5), но наблюдается значительная пластическая деформация алюминия на границе с армирующими проволоками. Уровень пластической деформации алюминия на границе с армирующими проволоками (до 0,5–0,6) выше в случае

расположения центра индентора над осью проволоки, причем угловая протяженность дуги контакта, вдоль которой происходит пластическая деформация алюминия, увеличивается по мере уменьшения диаметра проволок. Зона пластической деформации алюминия вдоль оси армирующей проволоки в случае расположения индентора над осью проволоки примерно соответствует проекции площади вдавленной лунки.

В связи с одноосным расположением армирующих элементов представляет интерес исследование различий напряженно-деформированного состояния в сечениях, нормальных и параллельных осям проволок.

На рис. 6 и 7 показано распределение перемещений и пластической деформации в ячейках поверхности деформированной пластины в осевых сечениях, нормальных и параллельных осям титановых проволок $\varnothing 0,375$ мм, при размещении индентора как между осями, так и над осью титановых проволок.

Рис. 6. Профили поверхности деформированной пластины после завершения процесса деформирования при размещении индентора между осями (а) и над осью (б) титановых проволок $\varnothing 0,375$ мм: 1 – в осевом сечении, нормальном к оси титановых проволок; 2 – параллельном оси титановых проволок

Анализ кривых на рис. 6 показывает, что в случае расположения индентора между осями титановых проволок отпечаток является круглым, а несколько различается лишь ширина выдавленного валика. При расположении ин-

дентора над осью титановой проволоки отпечаток имеет эллиптическую форму с большей осью, нормальной к осям проволок, что подтверждает сдерживание пластической деформации алюминия армирующей проволокой.

Рис. 7. Распределение пластической деформации в ячейках поверхности пластины после завершения процесса деформирования при размещении индентора между осями (а) и над осью (б) титановых проволок $\varnothing 0,375$ мм: 1 – в осевом сечении, нормальном к оси титановых проволок; 2 – параллельном оси титановых проволок

Анализ кривых на рис. 7 показывает близость распределения пластической деформации в ячейках вблизи поверхности деформированной пластины в осевых сечениях, нормальных и параллельных к оси титановых проволок, с двумя максимумами на расстоянии примерно 1 мм и почти полным отсутствием пластической деформации вблизи центра лунки, что хорошо коррелирует с различием в профилях получаемого отпечатка в перпендикулярных сечениях.

Выводы

1. Распределение пластической деформации в ячейках вблизи поверхности деформированной пластины в осевом сечении не монотонно и характеризуется двумя максимумами и почти

полным отсутствием пластической деформации вблизи центра лунки. Уменьшение в исследованном волокнистом композите диаметра армирующей титановой проволоки приводит к снижению уровня пластической деформации в зоне отмеченных максимумов. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу зафиксированы в армирующих титановых проволоках, причем уровень напряжений в них возрастал по мере уменьшения диаметра.

2. При расположении индентора между осями титановых проволок формируется круглый отпечаток, размер которого слабо зависит от диаметра армирующих проволок, а несколько различается лишь ширина выдавленного валика. При расположении индентора над осью

титановой проволоки отпечаток приобретает эллиптическую форму с большей осью, нормальной к осям проволок, что подтверждает сдерживание пластической деформации алюминия армирующей проволокой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матлин, М. М. Диагностика физико-механических свойств металла по параметрам упругопластического внедрения сферического индентора / М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина // Известия ВолГТУ : научный журнал № 6 (241) / ВолГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 58–62.
2. Biwa S., Storåkers B. An analysis of fully plastic Brinell indentation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1995. – Т. 43. – №. 8. – С. 1303–1333.
3. Гуревич, Л. М. Верификация моделирования трехосного напряженно-деформированного состояния на примере определения твердости по Бринеллю / Л. М. Гуревич, Р. Е. Новиков, С. П. Писарев, А. И. Мозгунова // Известия ВолГТУ : научный журнал № 12 / ВолГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 76–80.
4. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. – P. 541–547.
5. Bahri A. et al. Brinell indentation behavior of the stainless steel X2CrNi18-9: Modeling and experiments // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Т. 163. – С. 105142.
6. Johnson G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Engng Fract. Mech. 1985. V. 21, N 1. P. 31–48.
7. Borysiuk P. et al. Influence of Layered Structure of Composite Timber Floor Boards on Their Hardness // Drvna industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije. – 2019. – Т. 70. – №. 4. – С. 399–406.
8. Chen, D., Luo, Q., Meng, M., Li, Q., & Sun, G. (2019). Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres. Composites Part B: Engineering, 176, 107191.
9. Rosenberger, M. R., Forlerer, E., & Schvezov, C. E. (2007). Modeling the micro-indentation of metal matrix composites. Materials Science and Engineering: A, 463(1-2), 275–283.
10. Гуревич, Л. М. Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия / Л. М. Гуревич // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6 (109) / ВолГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 6–13.
11. Трыков, Ю. П. Научные основы проектирования и изготовления нового класса конструкционных материалов-слоистых интерметаллидных композитов / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – №. 4. – С. 132–134.
12. Моделирование процессов деформирования слоистых титано-алюминиевых композитов в процессе изгиба / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, В. М. Волчков, О. С. Киселев, В. Ф. Даненко, С. П. Писарев // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолГТУ. – Волгоград, 2012. – С. 11–15.
13. Гуревич, Л. М. Моделирование поведения титано-алюминиевого композита с дефектом в мягкой прослойке / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 20 / ВолГТУ. – Волгоград, 2014. – С. 43–46.