

УДК 539.373, 539.374

СКОРОСТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НЕОБРАТИМОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА GLARE

Н. С. Селютина^{1,2,*}, член-корреспондент РАН Ю. В. Петров^{1,2},
В. Парамесваран³, А. П. Шарма³

Поступило 08.04.2019 г.

Отклики алюминиевого многослойного композита на динамическое нагружение описываются с помощью релаксационной модели пластичности. Устанавливаются зависимости между скоростью чувствительностью многослойного композита, параметрами динамического нагружения и чувствительностью к скорости деформации его компонентов. Показано, что оценки чувствительности к скорости оказались выше для композита GLARE по сравнению с оценками чувствительности к скорости для его компонента — листового металла Al 2024-T3.

Ключевые слова: алюминиевый многослойный композит, скоростная чувствительность, Al 2024-T3, релаксационная модель пластичности, предел текучести.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524875507-510>

Начало процесса необратимой деформации металлических многослойных композитов при статических испытаниях могут рассматриваться как комбинация откликов композита и компонентов композита к приложенной нагрузке [1]. При динамических испытаниях деформирование слоистого композита подобно металлам напрямую зависит от значений скорости приложенной нагрузки [2–5]. В литературе показано, что отклики некоторых алюминиевых сплавов не проявляют эффекта чувствительности к скорости деформирования в определённых скоростных режимах [6], тогда как скоростная чувствительность в композите достигается благодаря его связующим компонентам — матрицы и волокнам. Например, в работе [7] показана скоростная чувствительность эпоксидной смолы. В общем случае трудно связать скоростную чувствительность самого многослойного композита к динамической нагрузке со скоростной чувствительностью его компонентов. Поэтому для прогнозирования деформации многослойного композита при динамических нагрузках на начальной стадии пластического деформирования сложно ориентироваться только на его деформацию при статических нагрузках и необходимо вводить в рассмотрение параметр, учитывающий структурно-временную природу скоростного эффекта.

В этой работе на основе обобщённой структурно-временной модели пластического деформирования (релаксационная модель пластичности) [8, 9] даются объяснение и оценки скоростной чувствительности металлических многослойных композитов на примере анализа испытаний композиционного материала GLARE (glass laminate aluminum reinforced epoxy) [3, 4] и листового металла Al 2024-T3 [10], составляющего основу композита GLARE. Будет показано, что скоростная чувствительность на начальной стадии пластического деформирования наблюдается в динамических испытаниях алюминия и многослойного композита.

В соответствии с применяемой моделью динамического предела текучести для произвольного импульса нагружения определяется на основе структурно-временного подхода [11–13]: $\text{Int}_p(t) \leq 1$, где

$$\text{Int}_p(t) = \left(\frac{1}{\tau}\right) \int_{t-\tau}^t \left(\frac{\Sigma(s)}{\sigma_y}\right)^\alpha ds. \text{ Здесь } \Sigma(t) \text{ — функция напряжений от времени, } \tau \text{ — характерное время релаксации напряжений, отвечающее за скоростную чувствительность материала, } \sigma_y \text{ — статический предел текучести, } \alpha \text{ — коэффициент амплитудной чувствительности материала. При этом макроскопический временной параметр } \tau \text{ является основным свойством материала, инвариантным по отношению к истории деформирования и зависящим от дефектной структуры материала [8, 9]. Равенство в вышеприведённом интегральном критерии текучести соответствует началу момента наступления макроскопической текучести } t^*.$$

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Институт проблем машиноведения

Российской Академии наук, Санкт-Петербург

³ Indian Institute of Technology Kanpur, India

*E-mail: nina.selutina@gmail.com

Рассмотрим релаксационную модель пластичности (RP model) [8, 9]. Пусть в образце задан линейный рост деформаций $\varepsilon(t) = \dot{\varepsilon} \cdot t \cdot H(t)$, где $H(t)$ — функция Хевисайда. Введём безразмерную функцию релаксации $0 < \gamma(t) \leq 1$:

$$\gamma(t) = \begin{cases} 1, & \text{Int}_p(t) \leq 1, \\ \frac{1}{\alpha \sqrt{\text{Int}_p(t)}}, & \text{Int}_p(t) > 1. \end{cases} \quad (1)$$

Равенство $\gamma(t) = 1$ в уравнении (1) связано с накоплением упругой деформации до начала макроскопической текучести t_* . Уменьшение функции релаксации в диапазоне $0 < \gamma(t) < 1$ соответствует переходу материала на стадию пластического деформирования. В течение пластического деформирования $t \geq t_*$ выполняется условие для $\gamma(t)$:

$$\text{Int}_p(t)\gamma(t) = 1. \quad (2)$$

Равенство (3) сохраняется за счёт фиксирования состояния в момент текучести $t = t_*$ (подробная расчётная схема t_* представлена в [9]) и последующей релаксации накопленных упругих напряжений в материале ($0 < \gamma(t) < 1$). Определим истинные напряжения в деформируемом образце при $t \geq t_*$ в следующей форме:

$$\sigma(t) = E(t)\varepsilon(t), \quad (3)$$

где $E(t) = E\gamma^{1-\beta}(t)$ — коэффициент, связанный с поведением напряжений, E — модуль Юнга, β — скалярный параметр ($0 \leq \beta \leq 1$), который описывает степень упрочнения материала. Случай $\beta = 0$ отвечает отсутствию упрочнения. Рассматривая стадии упругого и пластического деформирования отдельно, можем получить из уравнения (4) общую зависимость напряжений от деформаций:

$$\sigma(\varepsilon(t)) = \begin{cases} E\varepsilon(t), & \frac{\varepsilon(t)}{\dot{\varepsilon}} < t_*, \\ E\gamma^{1-\beta}\left(\frac{\varepsilon(t)}{\dot{\varepsilon}}\right)\varepsilon(t), & \frac{\varepsilon(t)}{\dot{\varepsilon}} \geq t_*. \end{cases} \quad (4)$$

Скоростную чувствительность в материале можно анализировать по зависимости предельного напряжения (точка начала необратимого деформирования материала, для металлов — предел текучести) от скорости деформирования и набору откликов материала к приложенной нагрузке различной длительности и амплитуды. С точки зрения релаксационной модели пластичности [8, 14] можно спрогнозировать различные типы деформационных кривых, реализующихся на одном материале в широком диапазоне скоростей деформации. В частности, увеличение скорости нагрузки может приводить к появлению

аномалий на начальной стадии пластического деформирования — “зубов” текучести. В этом случае переход на стадию пластического деформирования сопровождается наличием ярко выраженного максимального напряжения и последующего снижения напряжения на деформационной зависимости. Явление увеличения максимума напряжений вместе с прикладываемой нагрузкой может указывать на существование скоростной чувствительности в материале. Классические динамические модели пластического деформирования способны учитывать только случай проявления временной природы пластичности, когда с увеличением нагрузки возрастает предел текучести и сохраняется плавный переход на стадию необратимого деформирования.

Рассмотрим две деформационные зависимости для листового металла Al 2024-T3 [10] при комнатной температуре в испытаниях на растяжение на скоростях деформации $0,0005$ и 1100 c^{-1} . При параметрах релаксационной модели пластичности $\beta = 0,145$, $\alpha = 1$, $\tau = 5$ мкс теоретические зависимости на рис. 1 хорошо согласуются с экспериментальными зависимостями [10]. Принимая во внимание близкое расположение двух зависимостей при деформации свыше 1%, можно заключить, что в этом диапазоне с повышением скорости нагрузки Al 2024-T3 не имеет скоростной чувствительности. Наблюдаемый скачок напряжений в диапазоне деформаций

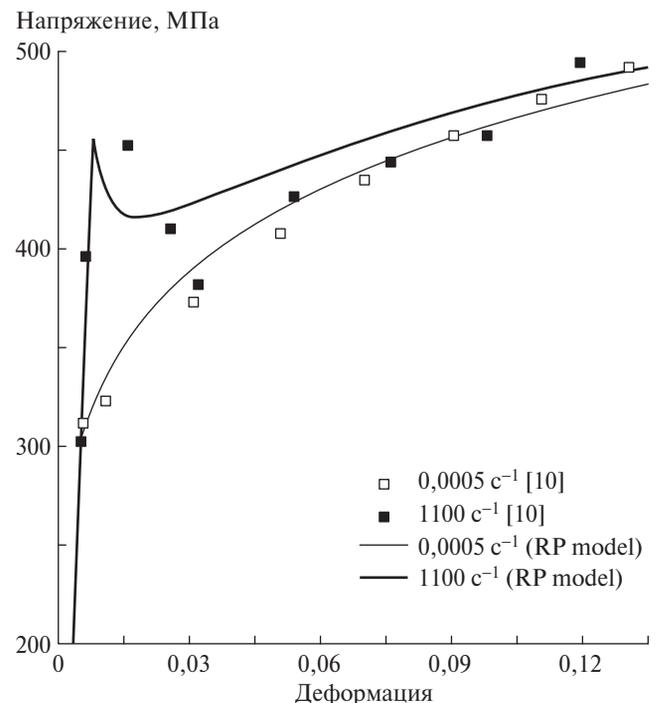


Рис. 1. Теоретические и экспериментальные отклики листового металла Al 2024-T3 [10] на скоростях деформации $0,0005$ и 1100 c^{-1} .

0,005–0,032 на скорости деформации 1100 c^{-1} , прогнозируемый с помощью релаксационной модели пластичности, показывает, что необратимая деформация материала проявляет свою временную природу в интервале скоростей $0,0005–1100 \text{ c}^{-1}$.

Рассмотрим динамические эксперименты [4, 5] на алюминиевых многослойных композитах Al 2024-T3 со связующим стекловолокном, содержащим эпоксидный слой. Композит GLARE [4] состоял из трёх слоёв xAl 2024-T3 с толщиной 4 мм и двух связующих слоёв с последовательностью [0/90/90/0] с толщиной 0,5 мм. В результате испытаний на растяжение, проведённых с помощью универсальной испытательной машины и на устройстве упругих волн, были получены деформационные зависимости для металлического многослойного композита GLARE [4] при скорости деформации $1,07$ и 386 c^{-1} . Теоретические зависимости, показанные на рис. 2, вычислены по параметрам модели $\beta = 0,45$, $\alpha = 1$, $\tau = 8$ мкс. На рис. 2 показан и спрогнозирован при помощи релаксационной модели пластичности классический случай проявления временного эффекта, когда монотонный рост нагрузки увеличивает значение предела текучести и сохраняет на деформационной зависимости плавный (монотонный) переход на стадию необратимого деформирования. Отклики на растяжение двух композитов GLARE [5] с двумя и тремя слоями 2024-T3 толщиной 0,6

и 0,4 мм соответственно имели связующие слои последовательности [0/90]. Динамические испытания многослойного композита [5] были проведены на мерном стержне Гопкинсона для двух порядков скоростей деформаций 10^{-3} и 10^3 c^{-1} . Теоретические зависимости, показанные на рис. 3 и 4, вычислены по параметрам модели $\beta = 0,45$, $\alpha = 1$, $\tau = 21$ мкс и $\beta = 0,4$, $\alpha = 1$, $\tau = 11$ мкс соответственно. На рис. 3 и 4 показаны отклики двух многослойных композитов к растягивающей нагрузке до начала процесса разрушения стекловолокна и процесса деламинации композита, полученных в испытаниях [5]. Как было показано в [15], при статических испытаниях начало процессов разрушения стекловолокна в композите происходит при деформации 0,03. Деформационные зависимости, показанные на рис. 3 и 4, при скорости деформации порядка 10^3 c^{-1} расположены значительно выше, чем при скорости деформации 10^{-3} c^{-1} , что подтверждает существование заметной скоростной чувствительности металлического композита. Скоростная чувствительность композита (GLARE) в основном обусловлена чувствительностью к скорости используемых компонентов волокна. Как используемое стекловолокно, так и эпоксидное связующее являются чувствительными к скорости. Отметим, что эти компоненты показывают хрупкое разрушение при деформации.

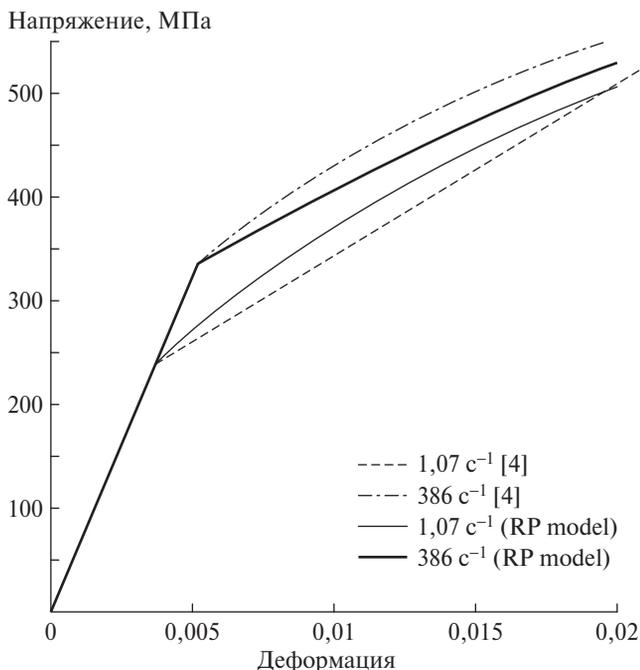


Рис. 2. Теоретические и экспериментальные отклики 3/2 слоистого композита [4] при скоростях деформации $1,07$ и 386 c^{-1} .

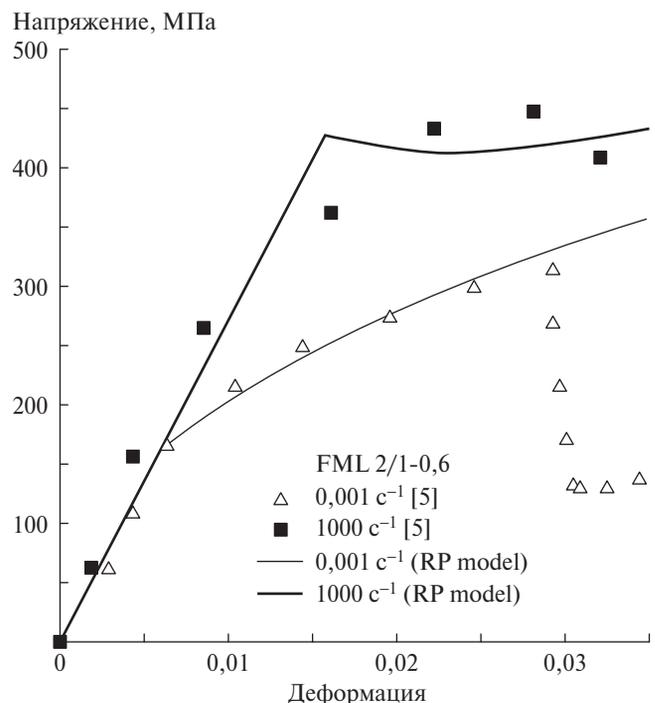


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные отклики 2/1 слоистого композита [5] при скоростях деформации $0,001$ и 1000 c^{-1} .

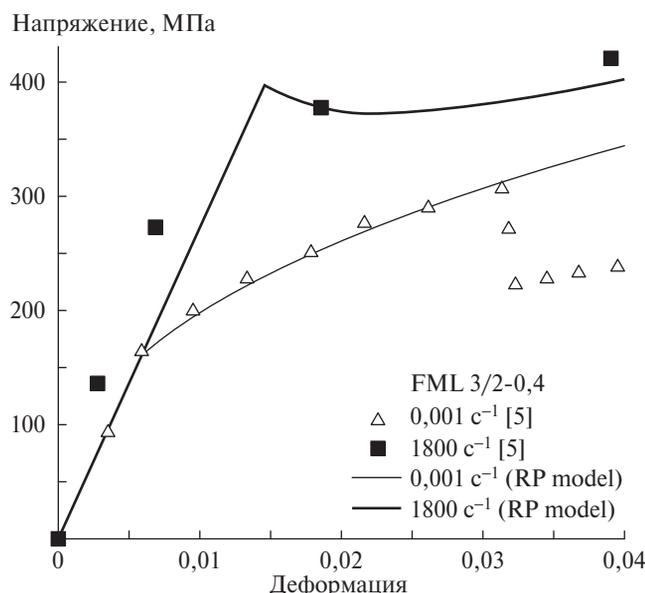


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные отклики 3/2 слоистого композита [5] при скоростях деформации 0,001 и 1800 с⁻¹.

В заключение отметим, что развитая релаксационная модель пластичности позволяет объяснять и строить нелинейные деформационные зависимости многослойного композита. Процесс деформации листового металла Al 2024-T3 и многослойного композита GLARE являются принципиально зависимыми от скорости деформирования. Полученные оценки характерного времени, основного параметра модели, дающего оценки скоростной чувствительности материала, оказались выше у металлического композита в сравнении с оценками у его компонента — листового металла Al 2024-T3.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ (18–51–80008 БРИКС).

Работа третьего автора выполнена при финансовой поддержке Department of Science and Technology, India, грант DST/IMRCD/BRICS/PilotCall2/FD-DLC/2018 (G).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vlot A., Gunnik W. *Fibre Metal Laminates: An Introduction*. Springer Netherlands. 532 p.
2. Zhou Y., Wang Y., Mallick P.K. // *Mater. Sci. Eng. A*. 2004. V. 381. P. 355–362.
3. Guida M., Marulo F., Meo M., Russo S. // *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2012. V. 19 (5). P. 376–395.
4. Santiago R.C., Alves M. // *Key Eng. Mater.* 2013. V. 535–536. P. 48–51.
5. Sharma A.P., Khan S.H., Parameswaran V. // *J. Compos. Mater.* 2018. 002199831880462.
6. Kim J.G., Kim H.C., Kwon J.B., Shin D.K., Lee J.J., Huh H. // *J. Compos. Mater.* 2015. V. 49 (10). P. 1179–1193.
7. Xia Y., Wang Y., Zhou Y., Jeelani S. // *Mater. Lett.* 2007. V. 61. P. 213–215.
8. Petrov Yu.V., Borodin E.N. // *Phys. Solid State*. 2015. V. 57. P. 353.
9. Selyutina N., Borodin E.N., Petrov Y., Mayer A.E. // *Int. J. Plast.* 2016. V. 82. P. 97.
10. Sancho R., Cendón D., Gálvez F. // *Procedia Engineer.* 2017. V. 197. P. 158–167.
11. Gruzdkov A.A., Petrov Yu.V. // *Dokl. Phys.* 1999. V. 44. P. 114.
12. Petrov Y.V., Gruzdkov A.A., Sitnikova E.V. // *Dokl. Phys.* 2007. V. 52. P. 691.
13. Gruzdkov A.A., Sitnikova E.V., Morozov N.F., Petrov Y.V. // *Math. Mech. Solids*. 2009. V. 14. P. 72.
14. Selyutina N.S., Petrov Yu.V. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2018. V. 57. P. 199–211.
15. Sharma A.P., Khan S.H., Parameswaran V. // *Compos. Part B-Eng.* 2017. V. 125. P. 259–274.

THE STRAIN-RATE SENSITIVITY OF IRREVERSIBLE DEFORMATION OF THE METALLIC MULTILAYER COMPOSITE GLARE

N. S. Selyutina^{1,2}, Corresponding Member of the RAS Yu. V. Petrov^{1,2},
V. Parameswaran³, A. P. Sharma³

¹Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation

²Institute for Problems in Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation

³Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, India

Received April 8, 2019

Responses of the aluminum multilayer composite to dynamic loading are described by the relaxation model of plasticity. Relations between the rate sensitivity of the multilayer composite, parameters of the dynamic loading and the strain rate sensitivity of its components are established. It is shown that estimates of the rate sensitivity turned out to be higher for GLARE composite in comparison to the rate sensitivity estimates for its component of Al 2024-T3 sheet metal.

Keywords: aluminum multilayer composite, rate sensitivity, Al 2024-T3, the relaxation model of plasticity, yield stress.