

ДИНАМИКА РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВОГО СПЛАВА АМг6

Скрипняк Н.В.^{1,2}

¹ Томский государственный университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36), e-mail: skr.ispms@mail.ru

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия (634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4)

Представлены результаты исследования динамики разрушения образцов листового проката сплава АМг6 в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с⁻¹. Обнаружено, что наличие наноструктурированных поверхностных слоев на тонколистовом прокате сплава АМг6 приводит к повышению прочностных характеристик в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с⁻¹. Для описания пластического течения и разрушения сплава АМг6 в указанном диапазоне скоростей деформации предложена модификация модели повреждаемой среды, предназначенная для описания процессов пластического течения и разрушения сплавов с ГЦК-решеткой, к которым относится сплав АМг6. Полученные экспериментальные данные о механическом поведении сплава АМг6 в широком диапазоне скоростей нагружения могут быть использованы при проектировании изделий и технологий их изготовления.

Ключевые слова: динамическая прочность, высокие скорости деформации, алюминиевые сплавы, компьютерное моделирование.

FRACTURE DYNAMICS OF AMG6 ALUMINIUM-MAGNESIUM ALLOY

Skripnyak N.V.^{1,2}

¹The National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, pr. Lenina, 36), e-mail: skr.ispms@mail.ru

²Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia (634021, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4)

Results of fracture dynamics research of AMG6 thin sheet in a range of strain rates from 10^{-3} to 10^3 s⁻¹ are presented. It is revealed that presence of nanostructured surface layers on thin sheet of AMG6 leads to increase the dynamic strength and ductility in a range of strain rates from 10^{-3} to 10^3 s⁻¹. The model modification is offered for the numerical simulation of a plastic flow and fracture of AMG6 alloy in a wide strain rate range for describing the processes of plastic flow and fracture of alloys with an fcc lattice, which include AMG6 alloy. Obtained experimental data on the mechanical behavior of the AMG6 alloy in a wide range of loading rates can be used for designing products and processes for their manufacture.

Keywords: dynamical strength, high strain rates, aluminium alloys, computer simulation.

Материалы и методика эксперимента

В настоящей работе объектом исследования был выбран алюминиевый сплав АМг6. Структурно-фазовое состояние материала в состоянии поставки исследовалось с использованием рентгеновского дифрактометра SHIMADZU XRD-6000. Сплав АМг6 имел следующий химический состав: Mg – 6,124%, Mn – 5,977%, Fe – 0,351%, Si – 0,310%, Zn – 0,203%, Ti – 0,0843%, Cu – 0,086%, Al – остальное.

Испытания образцов проката сплава АМг6 при одноосном растяжении и продавливании проводились на сервогидравлическом испытательном стенде Instron VHS 40/50-20 в соответствии с ГОСТ 1497-84, ГОСТ 10510-80, стандартами ASTM E643 - 09 и [1; 2; 6; 7].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1а показаны диаграммы истинное напряжение – истинная деформация (линии 1-3) для сплава АМг6, полученные при одноосном растяжении при скоростях деформации -

0,001, 552, 485 с⁻¹ соответственно. Диаграммы 1 и 2 получены для образцов листового проката сплава АМгб с толщиной 1,5 мм в состоянии поставки. Диаграмма 3 получена для образцов со структурированными поверхностными слоями [5]. Диапазон равномерной пластической деформации 0 – δ_p отмечен на диаграммах квадратными символами. При деформациях, превышающих δ_p , в сечении образца начинает формироваться локальное сужение. При деформациях, превышающих значения в точках А, в образцах развиваются повреждения и формируется магистральная трещина. Таким образом, динамика разрушения в условиях одноосного нагружения отражается на участке АВ диаграмм высокоскоростного растяжения образцов.

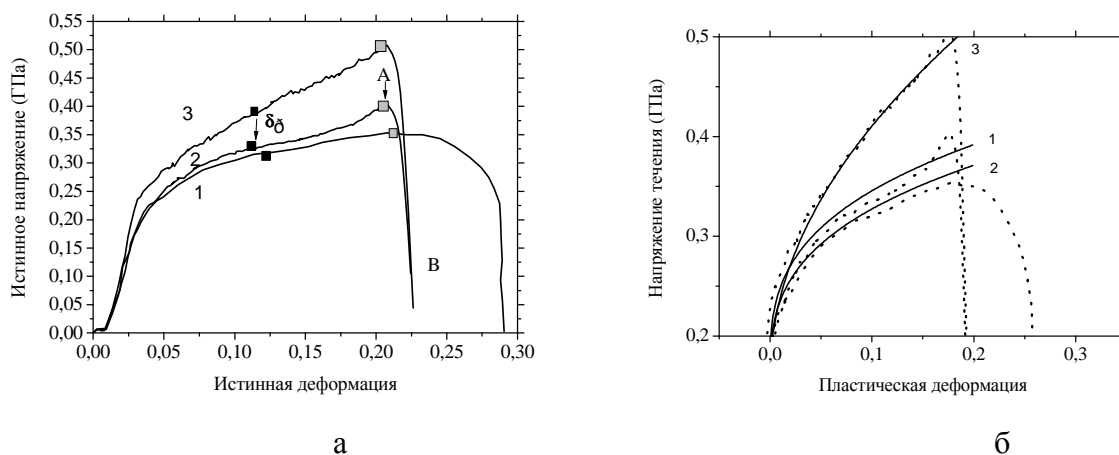


Рис. 1 - Диаграмма истинное напряжение – истинная деформация сплава АМгб в состоянии поставки (1), (2) и со структурированным поверхностным слоем (3).

Полученные экспериментальные данные были использованы для оценки параметров модели, предназначенной для описания процессов пластического течения и разрушения сплавов с ГЦК-решеткой, к которым относится сплав АМгб [5; 8; 10]. Численные значения коэффициентов модели уточнялись с использованием результатов компьютерного моделирования. Расчеты проведены с использованием оригинального программного комплекса и пакета Workbench ANSYS 13 AUTODYN. Расчеты выполнены с использованием метода дискретных элементов и метода сглаженных частиц (SPH). Определяющее уравнение было использовано в виде

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(m)} (1 - D), \quad \sigma_{ij}^{(m)} = -\delta^{(m)} \delta_{ij} + S_{ij}^{(m)}, \quad (1)$$

где σ_{ij} , S_{ij} - компоненты тензора и тензора девиатора эффективных напряжений, $\sigma_{ij}^{(m)}$, $S_{ij}^{(m)}$ - компоненты тензора и тензора девиатора напряжений в конденсированной фазе, p – давление, δ_{ij} – символ Кронекера, D – параметр поврежденности.

Уравнение состояния для давления использовалось в форме Ми-Грюнайзена

$$\delta^{(m)} = \tilde{N}_1 \xi + \tilde{N}_2 \xi^2 + \tilde{N}_3 \xi^3 + \tilde{N}_4 \rho_0^{(m)} E, \text{ при } \xi < 0, \quad (2)$$

$$\delta^{(m)} = K_1 \xi + K_2 \xi^2 + \tilde{N}_4 \rho_0^{(m)} E \text{ при } \xi > 0,$$

где C_1, C_2, C_3, K_1, K_2 – постоянные материала, C_4 – коэффициент Грюнайтзена, E – удельная внутренняя энергия, $\xi = (\rho^{(m)} / \rho_0^{(m)}) - 1$.

В расчетах использованы следующие значения параметров для сплава АМгб: $\rho_0^{(m)} = 2,65 \text{ г/см}^3$, $C_1 = 70,5$, $C_2 = 165,9$, $C_3 = 42,8$, $K_1 = 59,2 \text{ ГПа}$, $K_2 = 0$, $C_4 = 1,99$.

Для описания на микроскопическом уровне сопротивления деформированию легких сплавов использованы соотношения моделей [9; 10].

Напряжение пластического течения задано соотношением

$$\sigma_s = (A + B \varepsilon_{\text{eq}}^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}), \quad (3)$$

где A, B, C, n, m – константы материала,

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_{\text{eq}}}{\dot{\varepsilon}_0}, \quad \dot{\varepsilon}_{\text{eq}} = \sqrt{(2/3) \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}}, \quad \dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}, \quad \dot{\varepsilon}_{ij} - \text{компоненты тензора скорости деформации,}$$

$\varepsilon_{\text{eq}}^p = \int_0^t [(2/3) \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p]^{1/2} dt$, $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ – компоненты тензора скорости пластической деформации,

$$T^* = (T - 293 \hat{E}) / (T_m - 293 \hat{E}), \quad T - \text{температура, } T_m - \text{температура плавления.}$$

Уравнение (6) позволяет получить хорошее согласие расчетного напряжения течения с экспериментальными данными. Расчетные диаграммы и экспериментальные данные для листового проката АМгб в состоянии поставки и с наноструктурированными поверхностными слоями показаны на рис. 1б. Линии 1 и 2 соответствуют расчетам для материала в состоянии поставки и скоростям деформации 552 и 0,001 с⁻¹ соответственно. Расчеты выполнены при значениях параметров $A = 155 \text{ МПа}$, $B = 380 \text{ МПа}$, $C = 0,0041$, $n = 0,32$, $m = 2,51$, $T_m = 933 \text{ К}$. Линия 3 получена для пластин с наноструктурированными поверхностными слоями при скорости деформации 485 с⁻¹. Расчеты выполнены при значениях параметров модели $A = 155 \text{ МПа}$, $B = 775 \text{ МПа}$, $C = 0,0041$, $n = 0,5$, $m = 2,51$, $T_m = 933 \text{ К}$.

Прогнозируемое напряжение течения оказывается несколько завышенным после начала локализации пластической деформации в образце (в зоне шейки).

Динамика разрушения, обусловленная структурными превращениями в сплаве АМгб при развитии пластического течения, учитывалась в уравнении (4) с помощью параметра поврежденности D

$$D = \int_{\delta_p}^{\varepsilon_{eq}^p} \frac{d\varepsilon_{eq}^p}{\varepsilon_f}, \quad (4)$$

где ε_f – предельная степень пластической деформации до разрушения в условиях растяжения.

Величина ε_f рассматривалась как функция нормированной скорости деформации, температуры и параметра p/σ_{eq} , характеризующего сложное напряженное состояние

$$\varepsilon_f = D_1(1 + D_2 \ln(\dot{\varepsilon}^*)) (p / \sigma_{eq})^{D_3} (1 - D_4 T^*) \quad (5)$$

где D_1, D_2, D_3, D_4 - постоянные материала.

Критерий разрушения в этом случае может быть записан в виде

$$D = 1. \quad (6)$$

Для оценки численных значений коэффициентов соотношения (5) проведено компьютерное моделирование условий экспериментов по высокоскоростному продавливанию пластин из АМгб полусферическим индентером.

Испытания на динамическое продавливание образцов сплава АМгб проводилось с применением полусферического индентера диаметром 20 мм в диапазоне скоростей от 0,01 до 15 м/с.

Схема испытания на динамическое продавливание показана на рисунке 2а. Образец в форме диска диаметром d мм и толщиной h обозначен - 1, пуансон - 2, нижняя и верхняя части опорной матрицы – 3 и 4 соответственно. Испытания проводились на дисках из сплава АМгб толщиной 1,5 мм и диаметром 60 мм. Пуансон имел радиус $R = 10$ мм, а $D = 42$ мм.

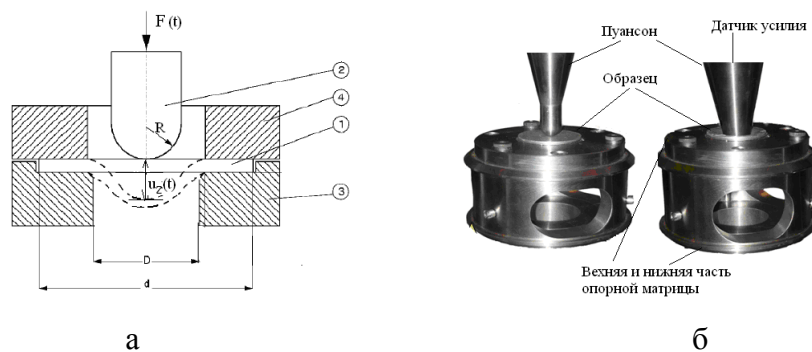


Рис. 2 – Схема нагружения образца на динамическое продавливание

Приспособление для испытания на динамическое продавливание к сервогидравлическому испытательному стенду Instron VHS 40/50-20 показано на рис. 2б. Жесткость рамы испытательного стенда обеспечивала проведение испытаний при скорости индентера от 1 до 20 м/с. Регистрация усилия продавливания $F(t)$ выполнялась с помощью сертифицированных пьезометрических измерительных головок Кистлера. Датчики калибровались для нагрузки 50 кН, допускали максимальную нагрузку 60 кН и максимальную перегрузку 72 кН. Точность измерения нагрузки составляет 0,25% в

диапазоне от 1 до 100% номинальной мощность датчика. Усилитель датчика Кистлера имеет частотный диапазон 0-200 кГц. Точность измерения смещений $u(t)$ поверхности контакта пуансона и образца обеспечивается калибровкой датчиков перемещений.

При проведении испытаний на универсальном испытательном стенде INSTRON VHS-40/50-20 обеспечивается постоянная скорость продавливания образцов. Для испытания применялись образцы диаметром 60 мм и толщиной 1,5 мм. Образцы вырезались механическим способом из листового проката сплава АМгб. Поверхность образцов обрабатывалась методом интенсивной пластической поверхностной деформации [5]. В качестве смазки поверхности контакта образца и индентора применялось индустриальное масло.

Регистрируемые во времени значения максимального перемещения в области продавливания образца $u_z(t)$ и усилия продавливания $F(t)$ могут быть преобразованы в диаграмму $F(u_z)$ усилие – максимальное перемещение образца в направлении продавливания. Диаграммы изменения усилий продавливания $F(u_z)$ от перемещения 1-5 для скоростей 10, 7,5, 5, 0,005, 0,005 м/с показаны на рис. 2а. Линии 1-4 получены для образцов листового проката сплава АМгб в состоянии поставки толщиной 1,5 мм, а линия 5 соответствует деформации образца с наноструктурированными поверхностными слоями.

Восходящая ветвь диаграмм на рис. 2 отражает закономерности неупругой деформации. Информация о динамике разрушения сплава АМгб в условиях высокоскоростного продавливания образца полусферическим пуансоном содержится в нисходящей ветви диаграмм. Развитие повреждений в пластине при продавливании полусферическим пуансоном происходит в условиях сложного напряженно деформированного состояния.

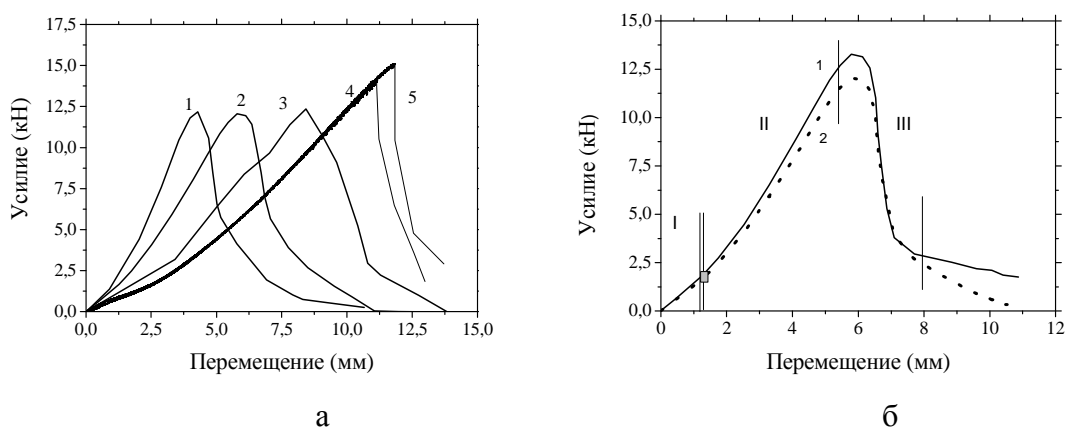


Рис. 3. Диаграммы продавливания пластин из сплава АМгб

На диаграмме $F(u_z)$ могут быть выделены характерные стадии (рис. 2б). Первая стадия соответствует упругой деформации пластины при продавливании. На второй стадии – в образце развиваются пластические деформации. Спад усилия деформирования на третьей стадии связан с образованием трещин и формированием зоны разрушения образца [3; 4].

Напряжение течения может быть определено по диаграмме продавливания с помощью соотношения [8]

$$\sigma_s = \alpha \frac{P(t)}{h^2}, \quad (7)$$

где $P(t)$ – величина усилия продавливания, h – толщина, α – параметр материала.

Величина усилия $P(t)$ в момент начала пластического течения определяется в точке пересечения диаграммы продавливания с прямой линией, параллельной оси усилия, отсекающей стадию I и смещенной на $0,1 h$ (рис. 2б) [6].

Отметим, что скорость продавливания влияет на динамику разрушения пластин и характер формирования трещин отрыва. Изменение характера разрушения с повышением скорости продавливания обусловлено развитием локализации пластической деформации в зоне интенсивного растяжения. Предельная деформация растяжения до разрушения ε_f может быть определена по измеренным значениям толщины на границе трещины с помощью соотношений [9]

$$\varepsilon_f \approx \gamma \frac{d_{\max}}{h}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_f \approx \ln\left(\frac{h_f}{h_0}\right), \quad (9)$$

где γ – параметр материала, h_f – толщина образца на границе трещины, h_0 – начальная толщина образца.

Соотношение (9) удобно применять для оценки предельной деформации до разрушения в условиях высокоскоростного продавливания. В этом случае зона разрушения имеет кольцевой характер (рис. 3в), не имеет вырывов, как при более низких скоростях продавливания (рис. 3б), и неоднородностей развития повреждений (рис. 3а).

При толщине образца на границе трещины 0,71 мм и начальной толщине пластины 1,47 мм предельная деформация ε_f при скорости 7,5 м/с оценивается равной 0,727.

На рис. 4 показано расчетное поле интенсивности пластических деформаций при продавливании со скоростью 7,5 м/с. Расчетные значения ε_f лежат в пределах 0,733–0,799, что согласуется с оценками по формуле (9). Расчеты выполнены при значениях параметров $D_1=0,21$, $D_2=0,4137$, $D_3=1$, $D_4=0$.

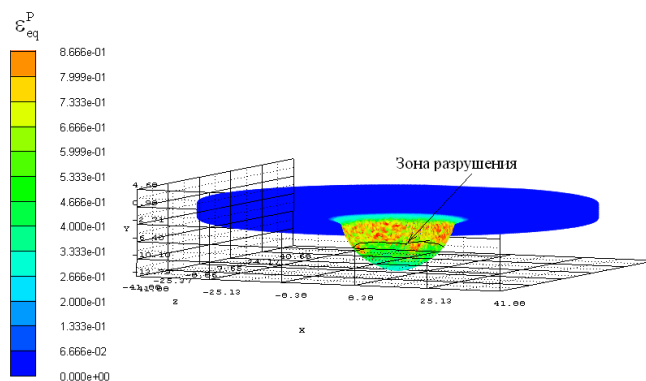


Рис. 4. Интенсивность пластической деформации в зоне продавливания

Расчетная зависимость силы продавливания от смещения центральной точки зоны контакта пластины и индентора при скорости продавливания 7,5 м/с показана на рис. 2б. Линия 1 - результаты расчета, линия 2 - экспериментальные данные. Отметим, что скорость деформации в зоне пластической вытяжки может варьироваться в пределах двух порядков.

Заключение

Предложенная модификация модели повреждаемой среды позволяет описывать закономерности пластического течения и разрушения сплава АМгб в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с $^{-1}$. Полученные экспериментальные данные о механическом поведении сплава АМгб в широком диапазоне скоростей нагружения, простом и сложном напряженном состоянии могут быть использованы при проектировании изделий и технологий их изготовления. Обнаружено, что наличие наноструктурированных поверхностных слоев на тонколистовом прокате приводит к повышению прочностных характеристик в диапазоне скоростей деформации от 10^{-3} до 10^3 с $^{-1}$.

Автор благодарит профессора Скрипняка В.А., доцентов Козулина А.А. и Скрипняк Е.Г. за помощь в проведении экспериментальных исследований и обсуждении результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218, Соглашений 14.B37.21.0441 и 14.132.21.1700 и финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3066.2012.8.

Список литературы

1. ГОСТ 1497-84. Методы испытаний на растяжение.
2. ГОСТ 10510-80. Металлы. Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену.
3. Козлов Э.В. Место дислокационной физики в многоуровневом подходе к пластической деформации / Э.В. Козлов, Л.И. Тришкина, Н.А. Попова, Н.А. Конева // Физ. мезомех. - 2011. - Т. 14, № 3. - С. 95-110.

4. Панин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // Физ. мезомех. - 2011. - Т. 14, № 3. - С. 7-26.
5. Скрипняк В.А. Моделирование влияния наноструктурированного поверхностного слоя на механическое поведение алюминиевых и магниевых сплавов при динамических воздействиях / В.А. Скрипняк, Е.Г. Скрипняк, Н.В. Скрипняк, А.А. Козулин // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010. – Т. 53, № 12-2. – С. 235-242.
6. ASTM E643 – 09. Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material. Downloaded/printed by Tomsk State University pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.
7. ASTM E8 – 04. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Downloaded/printed by Tomsk State University pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.
8. Holmquist T.J., Johnson G.R. // J. Appl. Phys. - 2002. – Vol. 91. – P. 5858-5867.
9. Rodriguez C., Garcia Cabezas J., Cardenas E. et. al. // Welding research. - 2009. – Vol. 88. – P. 188-192.
10. Rule W.K., Jones S.E. // Int. J. Impact Engineering. - 1998. – Vol. 21. No. 8. – P. 609-624.

Рецензенты:

Поляков В.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, электроники и информационной безопасности, декан физико-технического факультета, г. Барнаул.

Колубаев А.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией физики упрочнения поверхности ИФПМ СО РАН, г. Томск.