

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-36-43

А. И. Епишин, А. Ю. Малахов, В. В. Ткаченко

КАЛИБРОВКА УРАВНЕНИЯ ДЖОНСОНА-КУКА ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ ТЕРМОБИМЕТАЛЛА ЛАТУНЬ/ИНВАР

ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка

Автор, ответственный за переписку: Андрей Юрьевич Малахов (malakhov@ism.ac.ru)

Аннотация: В работе исследуются механические свойства компонентов термобиметалла латунь/Инвар, получаемого сваркой взрывом. На основании результатов механических испытаний на растяжение при комнатной температуре и комплексного анализа литературных данных о поведении материалов при высоких скоростях деформации и повышенных температурах получены полные наборы параметров уравнения Джонсона-Кука. Установлено, что стандартная форма модели Джонсона-Кука удовлетворительно описывает поведение латуни, в то время как для Инвара потребовалось введение температурной зависимости параметра коэффициента чувствительности к скорости деформации для адекватного учета его поведения в широком температурном диапазоне. Полученные уравнения планируется использовать для анализа пластического деформирования и расчета деформационного тепловыделения при сварке взрывом биметалла латунь/Инвар.

Ключевые слова: Сварка взрывом, биметаллы, латунь, Инвар, механические свойства

Благодарности: Научному сотруднику ИСМАН Денисову Игорю Владимировичу за помощь в подготовке статьи и обсуждение результатов

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания ИСМАН (номер госрегистрации FFSZ-2025-0003)

Для цитирования: Епишин А. И., Малахов А. Ю., Ткаченко В. В. Калибровка уравнения Джонсона-Кука для компонентов термобиметалла латунь/Инвар. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):36–43. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-36-43>

A. I. Epishin, A. Yu. Malakhov, V. V. Tkachenko

CALIBRATION OF THE JOHNSON-COOK EQUATION FOR THE COMPONENTS OF THERMOBIMETAL BRASS/INVAR

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, Chernogolovka

The author responsible for the correspondence: Andrey Yuryevich Malakhov (malakhov@ism.ac.ru)

Annotation: This study investigates the mechanical properties of the components of a brass/Invar thermobimetal produced by explosive welding. Based on the results of tensile tests at room temperature and a comprehensive analysis of literature data on material behavior under high strain rates and elevated temperatures, complete parameter sets for the Johnson-Cook constitutive equation were obtained. It was established that the standard form of the Johnson-Cook model satisfactorily describes the behavior of brass. However, for Invar, introducing a temperature dependence for a parameter strain rate sensitivity coefficient was necessary to adequately account for its behavior across a wide temperature range. The obtained constitutive equations are planned for use in analyzing plastic deformation and calculating deformation-induced heat generation during the explosive welding of the brass/Invar bimetal.

Keywords: Explosive welding, bimetals, brass, Invar, mechanical properties

Acknowledgements: To ISMAN researcher Igor Vladimirovich Denisov for his assistance in preparing the article and discussing the results

Funding: The study was carried out with the financial support of the ISMAN State Assignment (state registration number FFSZ-2025-0003)

To cite: Epishin A. I., Malakhov A. Yu., Tkachenko V. V. Calibration of the Johnson-Cook equation for the components of thermobimetal brass/Invar. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):36–43. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-36-43>

Сварка взрывом является эффективным многослойных материалов, в том числе, со технологическим методом для получения специальными служебными свойствами [1].

Высокая прочность соединений, образованных сваркой взрывом, достигается за счет высокоскоростного соударения компонентов, которому предшествует глубокое очищение свариваемых поверхностей за счет их сверхзвукового обтекания потоком горячего ударно-сжатого газа, что резко улучшает адгезию компонентов. Важным фактором, влияющим на качество сварного соединения, является тепловыделение, которое происходит по двум причинам – сильное сжатие газа в зазоре между свариваемыми пластинами [2] и ударная пластическая деформация металла в зоне контакта. Характер пластической деформации при сварке взрывом рассмотрен в работе [3].

Тепловыделение имеет положительный эффект, поскольку оно повышает термическую активацию процесса, но также оно может приводить и к образованию дефектов структуры сварного соединения, например, зон локального оплавления. Поэтому для планирования условий сварки взрывом требуется теоретическая оценка тепловыделения и температуры разогрева свариваемого металла.

Авторы настоящей работы теоретически изучают процесс деформационного тепловыделения при сварке взрывом термобиметалла латунь/инвар, который широко используется для термокомпенсаторов, чувствительных элементов термометров, терморегуляторов, автоматов защиты электросети, термоприводов и других подобных устройств. Поскольку пластическая деформация при сварке взрывом происходит при сильно изменяющихся температуре и скорости деформации, то для проведения численного анализа процесса пластического деформирования и расчета деформационного тепловыделения необходимы уравнения, описывающие сопротивление пластической деформации компонентов рассматриваемого биметалла в широком диапазоне условий нагружения. Для этой цели планируется ис-

пользовать феноменологическое уравнение, предложенное Джонсоном и Куком [4, 5] для описания сопротивления материалов большим пластическим деформациям в условиях высоких скоростей деформации и температур. Уравнение Джонсона-Кука часто применяется в исследованиях для аппроксимации результатов механических испытаний вследствие своей простоты [6].

Уравнение Джонсона-Кука определяет напряжение σ в материале в зависимости от накопленной пластической деформации ε_p , скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}_p$ и температуры T . В общем виде данное уравнение может быть записано в виде произведения трех сомножителей:

$$\sigma = f_1(\varepsilon_p) f_2(\dot{\varepsilon}_p) f_3(T), \quad (1)$$

где $f_1(\varepsilon_p)$ – диаграмма деформирования материала, полученная при базовых значениях T_0 и $\dot{\varepsilon}_{p,0}$, и записанная в координатах $\sigma - \varepsilon_p$; $f_2(\dot{\varepsilon}_p)$ – зависимость от скорости деформации, равная 1 при $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon}_{p,0}$; и $f_3(T)$ – зависимость от температуры, равная 1 при $T = T_0$.

Обычно, для функции $f_1(\varepsilon_p)$ используют степенной закон пластического упрочнения и записывают ее в виде:

$$f_1(\varepsilon_p) = A + B\sigma^n \quad (2)$$

для функции $f_2(\dot{\varepsilon}_p)$ обычно используют логарифмическую зависимость:

$$f_2(\dot{\varepsilon}_p) = 1 + C \frac{\ln \dot{\varepsilon}_p}{\ln \dot{\varepsilon}_{p,0}} \quad (3)$$

а функцию $f_3(T)$ записывают как:

$$f_3(T) = 1 - T_h^m \quad \text{где} \quad T_h = (T - T_0)/(T_m - T_0) \quad (4)$$

Здесь A, B, n, C, m и T_m – константы материала: A – предел текучести, B и n – константы деформационного упрочнения при базовых условиях $(T_0, \dot{\varepsilon}_{p,0})$; C и m – соответственно коэффициенты чувствительности материала к скорости деформации и изменению температуры; T_m – температура, при которой сопротивление материала пластическому деформированию равно нулю,

обычно принимаемая равной температуре плавления материала, и T_h – «гомологическая» температура. В качестве же базовой температуры, как правило, принимается комнатная $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, после суммирования (1-4) уравнение Джонсона-Кука принимает вид:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p,0}}\right) (1 - T_h^m) \quad (5)$$

В настоящей работе на основании проведенных механических испытаний и литературных данных оценены параметры уравнения Джонсона-Кука для компонент термометалла латунь/инвар, изготовленного авторами методом сварки взрыва ранее, см., например, [7]. Следует отметить, что поскольку свойства листовых латуни и инвара могут значительно отличаться в зависимости от истории их изготовления [8, 9] калибровку уравнения Джонсона-Кука следует проводить именно для тех материалов, которые использовались при сварки взрывом конкретного биметалла, для которого планируется проводить численные расчеты.

Сопротивление пластической деформации при комнатной температуре и стандартной скорости деформации

Объектами исследования в настоящей работе являлись пластины латуни Л63 и железоникелевого сплава 36Н (Инвар), соответственно толщиной 4,8 и 1,7 мм. Из пластин были изготовлены плоские образцы для механических испытаний. Образцы испытывали на растяжение в испытательной машине марки МИМ.2-100. Испытания проводили при комнатной температуре $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ со стандартной скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}\text{ с}^{-1}$ до разрушения. Для каждого материала были испытаны три образца и по результатам испытаний получены усредненные диаграммы $\sigma - \varepsilon$, где ε – полная деформация, см. синие графики с синими точками на рис. 1а, б. Для получения графиков $\sigma - \varepsilon_p$ из полной деформации была вычтена упругая составляющая, равная σ/K , где K – тангенс наклона графика в упругой области. Графики $\sigma - \varepsilon_p$ показаны на рис. 1 серым цветом.

Для калибровки уравнения Джонсона-Кука следует использовать только точки графика, соответствующие деформации образца до ее локализации (образования шейки). Полагалось, что локализация наступает тогда, когда при дальнейшей деформации

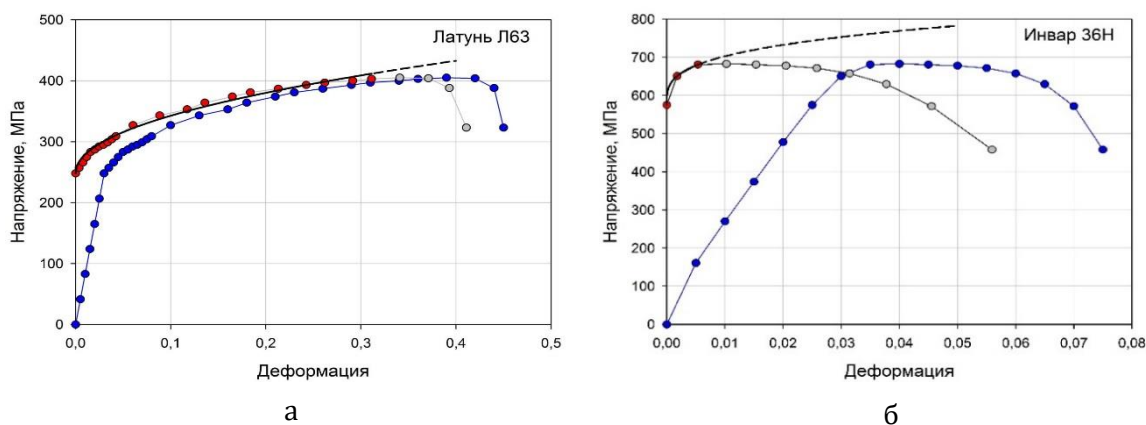


Рис. 1. Диаграммы растяжения латуни Л63 (а) и Инвара 36Н (б).

Комнатная температура $T_0 \approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}\text{ с}^{-1}$. Синим цветом показаны исходные кривые $\sigma - \varepsilon$, серым – пересчитанные кривые $\sigma - \varepsilon_p$, красным – точки до предполагаемой локализации пластической деформации (образования шейки), сплошными черными жирными линиями – аппроксимация красных точек степенной зависимостью (2), штриховыми черными жирными линиями – экстраполяция до предельной пластической деформации

образца напряжение σ либо перестает увеличиваться (плато) либо начинает падать (достигается явный максимум). Первый случай реализуется для латуни, см. красные зачетные точки на рис. 1а, второй – для инвара, см. рис. 1б. Деформационное упрочнение сплавов (красные точки) было аппроксимировано степенной зависимостью (2) и получены следующие значения: для латуни – $A=248$ МПа, $B=287,5$ МПа и $n=0,483$; для инвара – $A=575$ МПа, $B=513,3$ МПа и $n=0,3016$. Следует отметить, что полученные значения степени в законе упрочнения блики к таковым, полученным для латуни и Инвара в работах [10, 11] – $n=0,54$ для латуни в [10] и $n=0,3025$ для Инвара в [11].

Зависимость сопротивления пластической деформации от скорости деформации

Поскольку в настоящей работе механические испытания проводили только при одной скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, то для описания зависимости пластического упрочнения от скорости деформации использовали литературные данные.

Клозак с соавторами исследовали механические свойства «обычной латуни» при ударном нагружении в широком диапазоне

температур [9]. В качестве исследуемых объектов использовались листовые образцы обычной латуни, толщиной 1 мм. Перфорационные испытания проводили на стандартной испытательной машине Zwick с начальными скоростями удара от 40 до 120 м/с в диапазоне температур 20-260 °С. Зависимость $f_2(\dot{\epsilon}_p)$ аппроксимировали логарифмической функцией (3) со следующими параметрами $C = 0,0021$ и $\dot{\epsilon}_{p,0} = 1 \text{ с}^{-1}$. Данные параметры были приняты в уравнении Джонсона-Кука для латуни Л63 в настоящей работе.

Ли с соавторами исследовали механические свойства сплава Invar Fe-36Ni [10]. Цилиндрические образцы, размером $\varnothing 2 \times 2$ мм и $\varnothing 5 \times 5$ мм, испытывали на сжатие в испытательной машине Split Hopkinson Pressure Bar со скоростями деформации от 10^{-3} до 10^4 с^{-1} в диапазоне температур 20-800 °С. Зависимость напряжения от скорости деформации аппроксимировали линейной функцией $f_2(\dot{\epsilon}) = 1 + C\dot{\epsilon}$, что, однако не согласуется с другими известными экспериментальными данными.

Кавулок с соавторами исследовали пластичность сплава Invar 36 при высоких температурах [12]. Испытание образцов, диа-

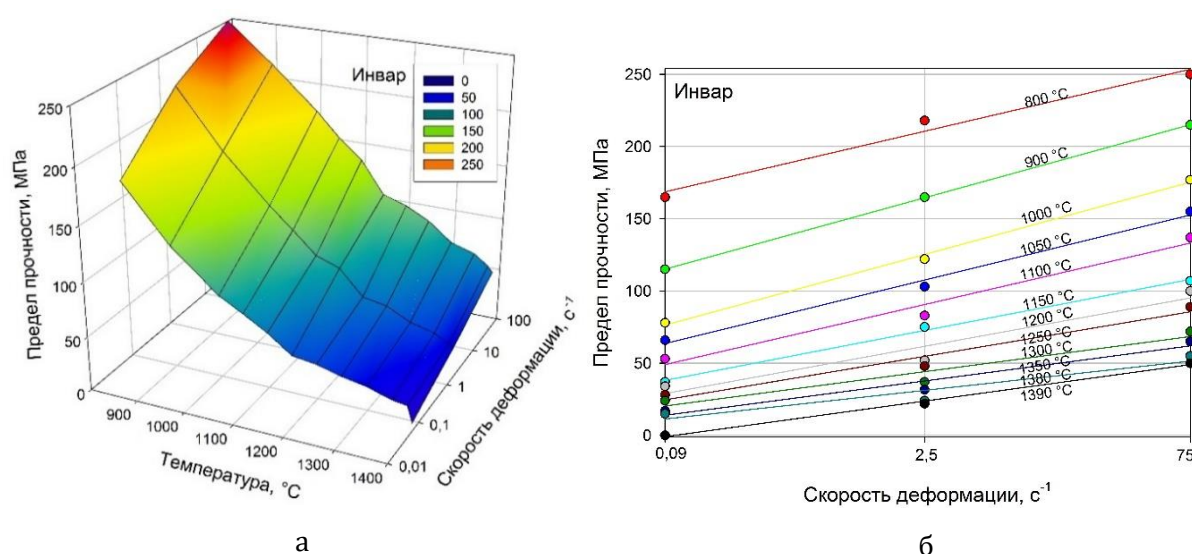


Рис. 2. Зависимость предела прочности σ_B Инвара 36Н от скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуры T (а). Зависимости $\sigma_B = f(\dot{\epsilon})$ для фиксированных значений T (б).

Оцифровано с рис. 3 в [12] и обработано в настоящей работе

метром 10 мм и длиной 116,5 мм, проводили на растяжение в испытательной машине HDS-20 со скоростями деформации 0,09; 2,5 и 75 с^{-1} в диапазоне температур 800-1390 °С. Результаты испытаний представлены в виде трехмерного графика предел прочности – скорость деформации – температура, см. рис. 2а. Отметим, что далее мы будем использовать такой параметр материала как предел прочности (предел временного сопротивления), характеризующий способность материала сопротивляться большим пластическим деформациям, которые происходят в материале при сварке взрывом.

На рис. 2, б представлены зависимости предела прочности от скорости деформации при фиксированных температурах в интервале 800-1390 °С, построенные по оцифрованным данным графика на рис. 2, а. Видно, что при каждой конкретной температуре напряжение сопротивления большим пластическим деформациям хорошо описывается логарифмической зависимостью (3). При повышении температуры вследствие термического разупрочнения графики $\sigma = a + b \cdot \ln \dot{\epsilon}$ смещаются вниз, а также несколько изменяют свой наклон. Из сравнения последнего уравнения с (3) следует, что коэффициенты чувствительности Инвара к скорости деформации следует рассчиты-

вать, как $C = b/a$.

Значение коэффициента C при комнатной температуре было получено оцифровкой данных с графика, представленного на рис. 3 в работе [11], и последующего регрессионного анализа, аналогично как показано на рис. 2б. Суммируя результаты обработки данных из работ [11] и [12] была построена температурная зависимость $C(T)$ для Инвара в диапазоне температур 20-1390 °С, см. рис. 3. Из рис. 3 видно, что коэффициент чувствительности к скорости деформации повышается с температурой. Данный результат представляется логичным, так как с повышением температуры в сплаве ускоряется диффузия и его полная пластическая деформация включает деформацию ползучести, величина которой зависит от времени деформирования. Зависимость $C(T)$ была аппроксимирована экспоненциальной функцией $C = C_0 \exp(T/T_0)$ с константами $C_0 = 0,0174$ и $T_0 = 523,8$ °С.

Зависимость сопротивления пластической деформации от температуры

Для анализа деформирования материала в процессе сварки важно знать его сопротивление большим пластическим деформациям, которое характеризуется пределом прочности материала σ_B .

На рис. 4, а красной линией показана тем-

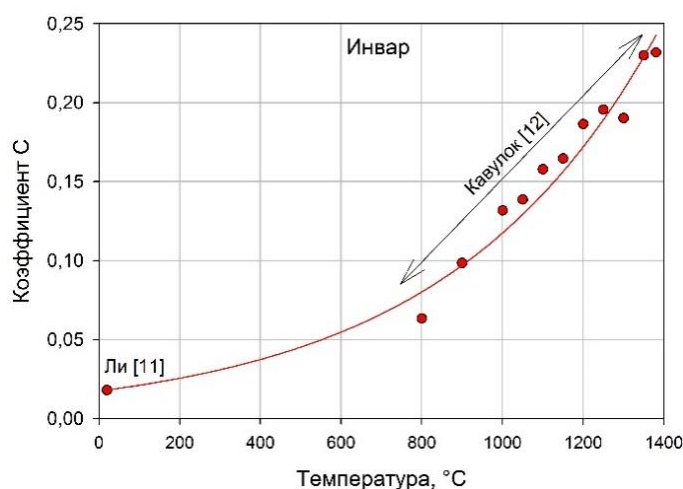


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента C чувствительности к скорости деформации для Инвара, построенная по результатам работ [11] и [12]

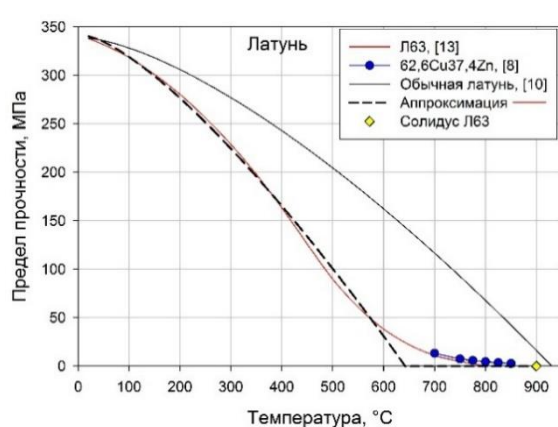
температурная зависимость предела прочности латуни Л63 из [13] в диапазоне температур 20-800 °С и синими точками латуни 62,6Cu37,4Zn из [8] в диапазоне температур 700-850 °С. Желтая ромбоэдрическая точка указывает температуру солидуса латуни Л63, равную ≈ 900 °С. Из рис. 4, а видно хорошее соответствие между данными [13, 8], и из них следует, что с повышением температуры прочность латуни монотонно понижается и при 650 °С опускается до ≈ 20 МПа, то есть материал становится очень пластически податливым. Сплошной черной линией показано температурное изменение σ_B , предсказанное с использованием уравнения (4) и параметров $T_0 = 20,15$ °С, $T_m = 930,15$ и $m = 1,45$ из [10]. Видно, что предсказанная таким образом кривая $\sigma_B = f(T)$ сильно превышает прочность латуни, особенно при высоких температурах. Поэтому экспериментальная зависимость $\sigma_B = f(T)$ была кусочно аппроксимирована: на участке 20-642,55 °С уравнением (4) с параметрами с $T_0 = 20$ °С, $T_m = 642,55$ °С и $m = 1,35$, и прямой $\sigma_B = 0$ на участке 642,55-900 °С, см. черную штриховую линию на рис. 4а. Следует отметить, что полученное значение параметра $m = 1,35$ близко к значениям $m = 1,45$ и $m = 1,132$, соответственно полученных для латуни в [10] и [14].

На рис. 4, б показаны экспериментальные

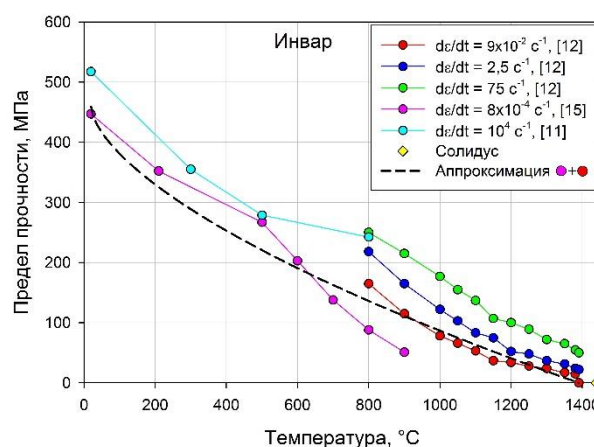
температурные зависимости сопротивления Инвара пластическому деформированию из работы [11] для температурного интервала 20-800 °С, из [15] для интервала 20-900 °С и из [12] для интервала 800-1390 °С. Данные температурной зависимости были получены при разных скоростях деформации, указанных на рис. 4а. Видно, что все кривые показывают подобную тенденцию – монотонное понижение σ_B вплоть до температур, близких к температуре солидуса Инвара, равную 1439 °С согласно [12]. Совместная аппроксимация уравнением (4) данных, полученных в [12] и [15] соответственно для скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 9 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\epsilon} = 8 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, дала следующее значение коэффициента чувствительности к температуре $m = 0,624$, с $T_0 = 20$ °С и $T_m = 1390$ °С. Следует отметить, что это значение m близко к значению $m = 0,55$, полученному Джонсоном и Куком для АРМКО-железа [5]. Полученная аналитическая зависимость показана на рис. 4, б штриховой линией.

Заключение

В результате комплексного подхода, сочетающего собственные эксперименты по растяжению и анализ литературных данных, впервые получены полные наборы параметров уравнения Джонсона-Кука для компонент биметаллической системы латунь Л63/Инвар 36Н, предназначенной для полу-



а



б

Рис. 4. Температурные зависимости предела прочности латуни (а) и Инвара (б)

чения сваркой взрывом.

Выявлено, что для сплава Инвар 36Н стандартная модель является недостаточной вследствие сильной температурной зависимости его чувствительности к скорости деформации. Предложена модифицированная версия уравнения, в которой параметр C представлен как экспоненциальная функция температуры: $C(T) = 0,0174 \times \exp(T/523,8)$. Остальные параметры составили: $A=575$ МПа, $B=513,3$ МПа, $n=0.3016$, $m=0,624$.

Полученные уравнения имеют следующий вид.

Для латуни Л63:

$$\sigma = (248 + 287,5\varepsilon_p^{0,483}) \left(1 + 0,0021 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p, \text{ c}^{-1}}{1, \text{ c}^{-1}} \right) \left[1 - \left(\frac{T-20^\circ\text{C}}{622,55^\circ\text{C}} \right)^{1,35} \right] \quad (6)$$

Для Инвара 36Н:

$$\sigma = (575 + 513,3\varepsilon_p^{0,3016}) \left(1 + 0,0174 \exp \frac{T}{523,8^\circ\text{C}} \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p, \text{ c}^{-1}}{1, \text{ c}^{-1}} \right) \left[1 - \left(\frac{T-20^\circ\text{C}}{1370^\circ\text{C}} \right)^{0,624} \right] \quad (7)$$

Данные уравнения будут использованы для аналитического исследования деформирования компонент и деформационного тепловыделения при сварке взрывом термометалла латунь/Инвар.

Библиографический список

1. Sherpa, B. B. Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: A review / B. B. Sherpa, R. Rani // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. – 2024. – Vol. 6. – Pp. 100078. <https://doi.org/10.1016/j.jalms.2024.100078>.
2. Preheating of Colliding Plates by a Shock-Compressed Gas during Explosive Welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, A. D. Kochkalo // *Russian Metallurgy*. – 2024. – Vol. 2024. – Pp. 1166-1174. <https://doi.org/10.1134/S0036029524702173>.
3. Gul'Bin, V. N. Plastic deformation of metals in explosion welding / V. N. Gul'Bin, A. G. Kobelev // *Welding*

International. – 1999. – Vol. 13(4). – Pp. 306-309. <https://doi.org/10.1080/09507119909447385>

4. Johnson, G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. – Proceedings 7th International Symposium on Ballistics. – Arlington: ADPA. – 1983. – Vol. 21. – Pp. 541-547.

5. Johnson G.R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G. R. Johnson, W. H. Cook // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1985. – Vol. 21(1). – Pp. 31-48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)

6. Laakso, S. Modified Johnson-Cook flow stress model with thermal softening damping for finite element modeling of cutting / S. Laakso, E. Niemi // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. – 2016. – Vol. 230. – Pp. 8587. <https://doi.org/10.1177/0954405415619873>

7. Morphology and Structure of Brass-Invar Weld Interface after Explosive Welding / A. Malakhov, A. Epishin, I. Denisov, I. Saikov, G. Nolze // *Materials*. – 2022. – Vol. 15(23). – Pp. 8587. <https://doi.org/10.3390/ma15238587>

8. Ефремов, Б. Н. Латунь: от фазового строения к структуре и свойствам / Б. Н. Ефремов // М.: ИНФРА-М. – 313 с.

9. Nan, J. Yielding behavior of low expansion invar alloy at elevated temperature / J. Nan, G. Li, K. Xu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 114. – Pp. 35-40. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00732-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00732-4)

10. Mechanical Properties of Brass under Impact and Perforation Tests for a Wide Range of Temperatures: Experimental and Numerical Approach / M. Klosak, T. Jankowiak, A. Rusinek, A. Bendarma, P. W. Sielicki, T. Lodygowski // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(24). – Pg. 5821. <https://doi.org/10.3390/ma13245821>

11. Li, G. Study on constitutive relationship of Fe-36Ni invar alloy / G. Li, Y. Cai, H. Qi // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vols. 291-294. – Pp. 1131-1135. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.1131>

12. Formability of Invar 36 alloy at high temperatures / P. Kawulok, D. Jurek, I. Schindler, R. Kawulok, K. Opěla, J. Němec, M. Kawuloková, S. Ruzs, M. Sauer // *Journal of Metallic Materials*. – 2022. – Vol. 74 (1). – Pp. 15-20.

13. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 2-3. Цветные металлы и сплавы / Под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.

14. Taylor's Test Technique for Dynamic Characterization of Materials: Application to Brass / R. Julien, T. Jankowiak, A. Rusinek, P. Wood // *Experimental Techniques*. – 2016. – Vol. 40. – Pg. 347-355. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0038-4>

15. Effect of Temperature and Strain Rate on Deformation Behavior of Invar 36 Alloy / L. Xifeng, N. Chen, J. Li, X. He, H. Liu, X. Zheng, J. Chen // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2017. – Vol. 53(8). – Pp. 965-975. <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2017.00043>

Информация об авторах

Епишин Александр Игоревич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения

им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН РАН). НИЛ «Ударно-волновых процессов»

E-mail: a.epishin2021@gmail.com

Малахов Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН РАН), НИЛ «Ударно-волновых процессов».

E-mail: malakhov@ism.ac.ru

Ткаченко Валерий Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН РАН), НИЛ «Ударно-волновых процессов». ИСМАН РАН.

E-mail: tkachenkoism@mail.ru

Information about the authors

Aleksander I. Epishin – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences Problems of the Russian Academy of Sciences (ISMAN RAS), Research Laboratory of Shock-Wave Processes

E-mail: a.epishin2021@gmail.com

Andrey Yu. Malakhov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences Problems of the Russian Academy of Sciences (ISMAN RAS), Research Laboratory of Shock-Wave Processes

E-mail: malakhov@ism.ac.ru

Valery V. Tkachenko – Postgraduate Student, Junior Research A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences Problems of the Russian Academy of Sciences (ISMAN RAS), Research Laboratory of Shock-Wave Processes

E-mail: tkachenkoism@mail.ru

Вклад авторов

А. И. Епишин – определение цели работы, анализ экспериментов, написание текста статьи

А. Ю. Малахов – определение цели работы, написание текста статьи, участие в обсуждении результатов

В. В. Ткаченко – подготовка образцов, проведение механических испытаний, участие в обсуждении результатов

Contribution of the authors

A. I. Epishin – defining the purpose of the work, analyzing the experiments, and writing the article

A. Yu. Malakhov – defining the purpose of the work, writing the article, and participating in the discussion of the results

V. V. Tkachenko – preparing the samples, conducting mechanical tests, and participating in the discussion of the results

*Статья поступила в редакцию 14.10.2025, доработана 05.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 14.10.2025, revised 05.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*