

УДК 004:621.777.01
DOI 10.17513/snt.39695

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В СИСТЕМЕ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ РАПИД-2D

^{1,2}Логинов Ю.Н., ^{1,3}Замараева Ю.В., ³Антоненко Л.В.

¹*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук, Екатеринбург, e-mail: zamaraevajulia@yandex.ru;*

²*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru;*

³*ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский,
e-mail: AntonenkoLV@kumw.ru*

В работе излагается опыт использования отечественного программного продукта – системы анализа процессов пластического деформирования РАПИД-2D применительно к моделированию прессования алюминиевого сплава. Программный модуль реализует метод конечных элементов. Изложена постановка задачи, приведены конкретные значения геометрических и физических параметров. Рассмотрен случай прессования из полого слитка наружным диаметром 650 мм и внутренним диаметром 300 мм с получением трубы наружным диаметром 350 мм и внутренним диаметром 300 мм. Получено распределение расчетных величин по продольному сечению очага деформации. В том числе рассчитаны такие параметры, как степень деформации, компоненты тензора деформации и показатель напряженного состояния. Сделан вывод о преобладании влияния радиальной компоненты тензора деформации над тангенциальной компонентой в формировании распределения степени деформации. Выполнено сравнение между показателями деформации, определяемыми через геометрию заготовки и изделия и рассчитанными программным способом. Показано, что расчет по программе приводит к большим значениям, что объяснено возможностью учета сдвиговой компоненты тензора деформации. Показано, что показатель напряженного состояния может достигать значения 21 вблизи поверхности пресс-шейбы и снижаться до нулевого значения после выхода готовой трубы из матрицы.

Ключевые слова: прессование, алюминиевый сплав, Рапид-2D, метод конечных элементов

*Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Давление»
№ АААА-А18-118020190104-3.*

SIMULATION OF THE PROCESS OF PRESSING ALUMINUM ALLOY IN THE SYSTEM OF ANALYSIS OF PLASTIC DEFORMATION PROCESSES RAPID-2D

^{1,2}Loginov Yu.N., ^{1,3}Zamaraeva Yu.V., ³Antonenko L.V.

¹*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, e-mail: zamaraevajulia@yandex.ru;*

²*Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru;*

³*JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky,
e-mail: AntonenkoLV@kumw.ru*

The paper presents the experience of using a domestic software product – a system for analyzing plastic deformation processes RAPID-2D in relation to modeling the pressing of an aluminum alloy. The program module implements the finite element method. The statement of the problem is stated, specific values of geometric and physical parameters are given. The case of pressing from a hollow ingot with an outer diameter of 650 mm and an inner diameter of 300 mm to obtain a pipe with an outer diameter of 350 mm and an inner diameter of 300 mm is considered. The distribution of calculated values along the longitudinal section of the deformation zone is obtained. Including calculated such parameters as the degree of deformation, the components of the strain tensor and the stress state index. The conclusion is made about the predominance of the influence of the radial component of the strain tensor over the tangential component in the formation of the distribution of the strain degree. A comparison is made between the deformation indices determined through the geometry of the workpiece and the product and those calculated by the software. It is shown that the calculation by the program leads to large values, which explains the possibility of taking into account the shear component of the strain tensor. It is shown that the stress state index can reach a value of 21 near the surface of the press washer and decrease to zero after the finished pipe exits the die.

Keywords: extrusion, aluminum alloy, Rapid-2D, finite element method

*The work was carried out within the framework of the state task on the topic “Pressure”
No. АААА-А18-118020190104-3.*

Большинство расчетов в области математического моделирования процессов обработки давлением реализуется с использованием зарубежных программных продуктов [1], здесь на первых местах находятся такие программные средства, как, например, DEFORM [2, 3] или ABAQUS [4]. Использование метода конечных элементов позволяет решить многие задачи, в том числе установить связи между термомеханическими параметрами и зеренной структурой металла [5]. Вместе с тем существуют и отечественные разработки, им недостаточно уделяется внимания, что совершенно не соответствует объявленным принципам импортозамещения. Система анализа процессов пластического деформирования РАПИД-2D разрабатывалась в Уральском федеральном университете для моделирования [6], в основном задач кузнечно-штамповочного производства (КШП). Первоначально метод решения затрагивал только постановки задач в 2D постановке (Copyright © Полищук Е.Г., Жиров Д.С., 2000–2004), но затем появились варианты вычислительного продукта для задач объемной деформации. Во всех случаях требовалось задание свойств вязкости среды, что обычно характерно для процессов горячей деформации и не характерно для процессов холодной деформации. Это объясняется тем, что в пакете программ реализован алгоритм решения, основанный на связи напряжений со скоростями деформации.

Прессование, как разновидность процесса обработки давлением, в какой-то мере ассоциируется с процессами КШП, но имеет свою специфику: целью ставится получить изделие большой длины, что достигается в традиционных приемах КШП кузнечной протяжкой. Некоторые задачи прессования в системе анализа процессов пластического деформирования РАПИД-2D были решены, например, для оценки роли теплопередачи при обработке латуней [7] и для оценки влияния компонентов тензора деформации на текстурообразование циркония [8]. Специфика процесса прессования по отношению к другим методам обработки давлением заключается в реализации больших и даже очень больших деформаций. Если речь идет о прессовании алюминиевых сплавов, то знание полей распределения деформаций позволяет оценить возможность протекания процессов динамической рекристаллизации, что позволяет получить продукцию с заданным уровнем свойств [9] и заданной структурой [10]. Особенностью прессования алюминиевых сплавов является реализация процесса при малых

скоростях нагружения. Это предопределяет торможение процессов рекристаллизации и получение изделия с более высоким уровнем прочности [11, 12]. Однако снижение скорости деформации в алгоритме решения задачи, основанном на зависимости напряженного состояния именно от скоростного фактора, делает неочевидным достижение конечного результата.

Целью работы является оценка возможности моделирования прессования в системе РАПИД-2D применительно к алюминиевым сплавам.

Схема деформации, постановка задачи моделирования и результаты решения

Рассматривается следующая схема деформации. Слиток 1 (рис. 1) размещен в контейнере 2 и выдавливается пресс-шайбой 3 через отверстие матрицы 4. В отличие от прессования тяжелых цветных металлов, где применяется прессовая прошивка, для прессования полых профилей из алюминиевых сплавов в слитке предварительно выполнено сквозное отверстие, через которое проходит игла 5. На выходе из матрицы формируется труба 6.

Геометрические параметры прессового инструмента:

- диаметр полости контейнера 650 мм;
- диаметр иглы 300 мм;
- диаметр отверстия матрицы 350 мм;
- угол наклона образующей матрицы к оси прессования 75°.

Процесс прессования осуществляется на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 60 МН.

Кривая упрочнения алюминиевого сплава марки АМгб задана на основании справочных данных, температура заготовки равна 490 °С, температуры контейнера и матрицы 400 °С и иглы 200 °С. Коэффициент теплопередачи принят равным 0,0559 Вт/(мм²*град). Показатели трения по Зибелю на стенке контейнера 0,8, на матрице и игле 0,2.

На рисунке области равного уровня соответствуют распределению степени деформации сдвига Λ_c , связанной со степенью деформации ϵ_c соотношением

$$\Lambda_c = \sqrt{3} * \epsilon_c . \quad (1)$$

Степень деформации при прессовании часто определяют приближенно по формуле

$$\epsilon_c = \ln [(D_3^2 - d^2) / (D_T^2 - d^2)] , \quad (2)$$

где D_3 , d , D_T – диаметры заготовки, внутренний и наружный диаметры трубы соответственно.

Выполненный по формулам (1) и (2) расчет показывает, что $\Lambda_c = 4,03$, $\epsilon_c = 2,32$.

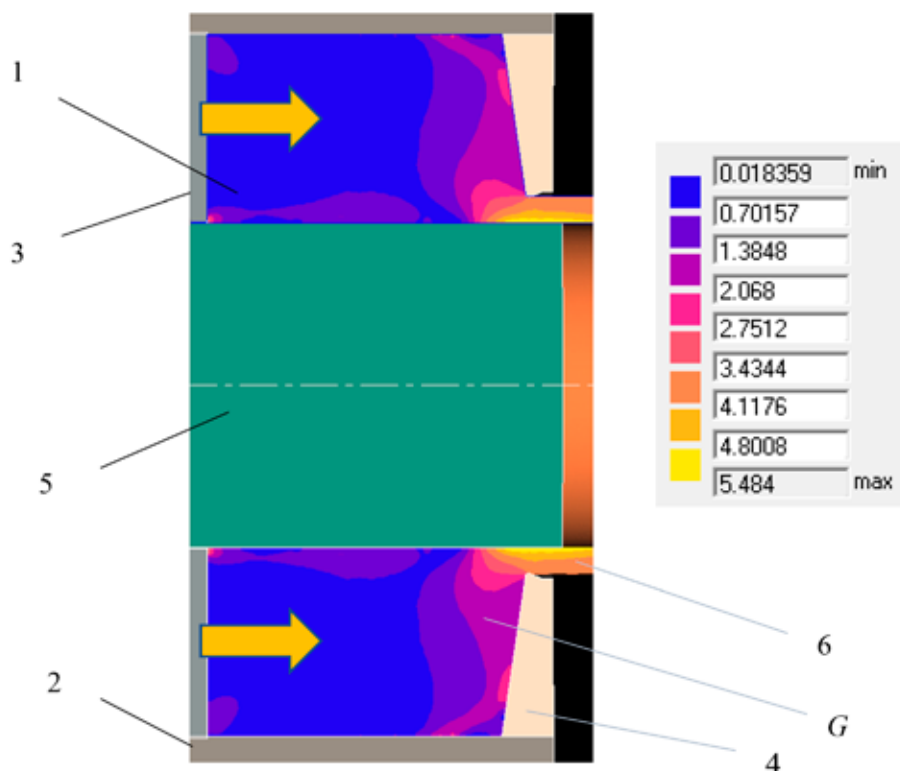


Рис. 1. Схема процесса прямого прессования слитка 1 из контейнера 2 пресс-шайбой 3 через матрицу 4 с помощью иглы 5 с получением трубы 6, показано распределение степени деформации сдвига Λ в очаге деформации G в виде цветных уровней с масштабной таблицей, стрелки – направление перемещения инструмента

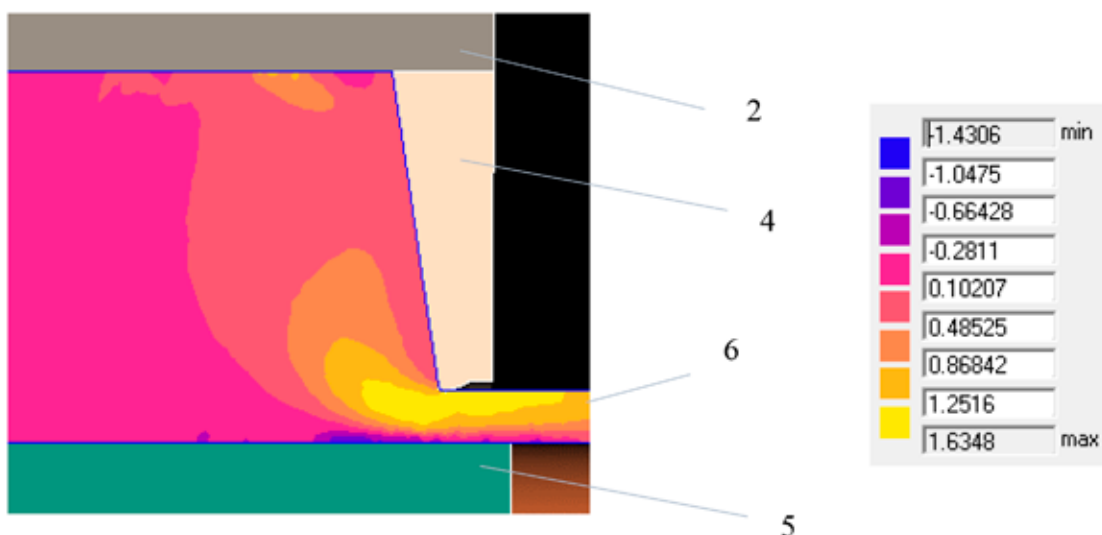


Рис. 2. Распределение компоненты тензора деформации ε_x в очаге деформации в виде цветных уровней с масштабной таблицей, верхняя часть очага деформации, обозначения как на рис. 1

По рис. 1 видно, что максимальное значение $\Lambda = 5,48$ и оно превышает величину $\Lambda_c = 4,03$, что объясняется тем, что Λ_c не учитывает сдвиговых деформаций, а их

уровень при прессовании гораздо выше, чем при прокатке или волочении из-за резкого изменения траектории перемещения элементарной частицы.

Действительно, если рассмотреть отдельно распределение компоненты тензора деформации ϵ_{rz} (рис. 2), то ее максимальное значение равно 1,63. В соответствии с рис. 2 повышенный уровень компоненты ϵ_{rz} характерен для зоны, примыкающей к внутренней поверхности трубы. Но в соответствии с рис. 1 степень деформации выше в зоне, примыкающей к наружной поверхности. Для установления причин этого рассчитаем коэффициент вытяжки по толщине стенки λ_{cr} , что будет косвенно говорить о величине радиальной деформации

$$\lambda_{cr} = (D_3 - d_T) / (D_T - d_T) = 350/50 = 7, \quad (3)$$

и коэффициент вытяжки в тангенциальном направлении

$$\lambda_{сф} = (D_3 + d_T) / (D_T + d_T) = 475/325 = 1,46. \quad (4)$$

Проверка показывает, что произведение $\lambda_{cr} * \lambda_{сф}$ отображает общий коэффициент

вытяжки по площади, равный 10,23. Результаты оценки вклада радиальной и тангенциальной деформации в соответствии с формулами (3) и (4) приводят к выводу о том, что преобладают в процессе радиальные деформации, при этом они должны оказаться деформациями сжатия (укорочения). На рис. 3 приведено распределение компоненты тензора деформации ϵ_{rr} . Действительно, ближе к внутренней поверхности трубы радиальные деформации сжатия доходят до величины -2,04, что несколько больше радиальной логарифмической деформации $\epsilon_{cr} = \ln \lambda_{cr} = 1,95$. Как было показано выше, вклад тангенциальной деформации в накопленную степень деформации невелик и им можно пренебречь. Отсюда формулируется вывод, что накопленная степень деформации оказывается выше в зонах при внутренней поверхности трубы за счет радиальной компоненты тензора деформации.

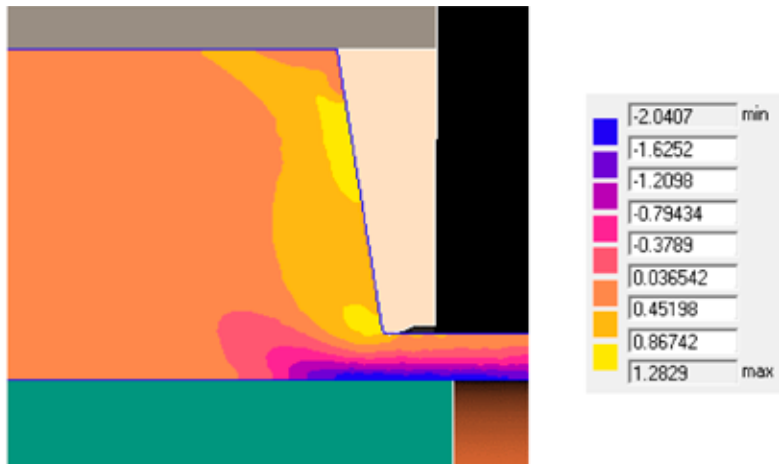


Рис. 3. Распределение компоненты тензора деформации ϵ_{rr} в очаге деформации в виде цветных уровней с масштабной таблицей, верхняя часть очага деформации

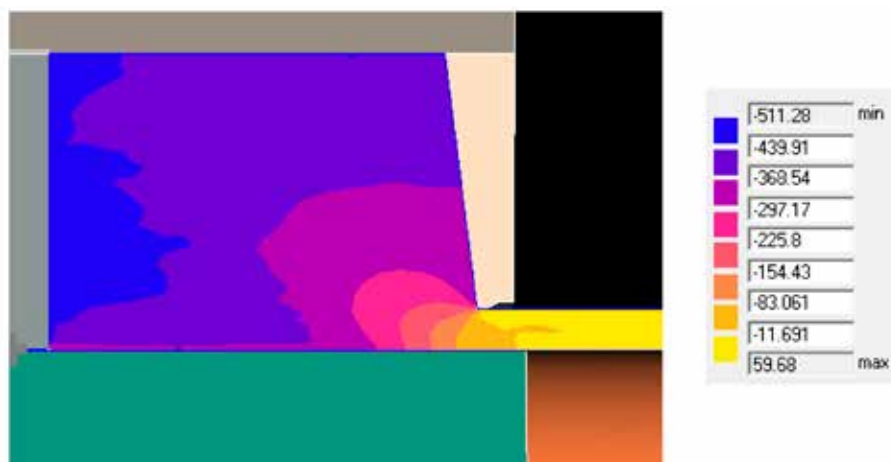


Рис. 4. Распределение компоненты тензора напряжений σ_{zz} в очаге деформации в виде цветных уровней с масштабной таблицей, верхняя часть очага деформации



Рис. 5. Распределение показателя напряженного состояния σ/T в очаге деформации в виде цветных уровней с масштабной таблицей, верхняя часть очага деформации

Существенным моментом в описании напряженного состояния является определение осевого напряжения σ_{zz} , поскольку его значение вблизи поверхности пресс-шайбы оказывается равным давлению прессования, а с его использованием удастся рассчитать усилие прессования. Как видно из рис. 4, максимальное по модулю напряжение равно 511 МПа. Эта величина считается допустимой с позиции оценки прочности прессового инструмента.

Для оценки возможности разрушения металла используют показатель напряженного состояния σ/T , где σ – среднее нормальное (гидростатическое) напряжение, T – интенсивность касательных напряжений. Для оценки пластических свойств металлов применяют диаграммы разрушения, построенные в координатах степень деформации сдвига до разрушения – показатель напряженного состояния. В некоторых случаях в качестве второго аргумента применяют показатель Лоде.

Показатель напряженного состояния изменяется по ходу перемещения элементарной частицы в сторону выхода из очага деформации от -21 до 0. Это говорит о преобладании высоких напряжений сжатия, что вообще является характерным признаком процесса прессования и благодаря чему в этом процессе удается обрабатывать давлением малопластичные металлы и сплавы. При высоком уровне сжимающих напряжений вблизи поверхности пресс-шайбы сформирована жесткая зона, где металл не подвергается пластической деформации. Уровень гидростатических напряжений уменьшается вблизи поверхности матрицы, но именно здесь реализуются наибольшие деформации.

Вместе с тем в соответствии с теорией разрушения металлов показатель напряжен-

ного состояния рассматривают одновременно со значениями собственно накопленной деформации. Горячая обработка алюминиевых сплавов направлена часто на то, чтобы получить максимальную прочность готового изделия. Для этого надо затормозить процессы рекристаллизации, и это удастся сделать в процессах горячей деформации именно для алюминиевых сплавов, обладающих очень высокой энергией дефектов упаковки. В области прессования это приводит к необходимости понижать скорость перемещения пуансона, что снижает скорость деформации и вообще-то снижает производительность оборудования. Эффект торможения рекристаллизации приводит к повышению прочности, но одновременно возникает опасность накопления такой деформации, при которой пластичность металла снижается до опасных уровней. Именно поэтому важно сопоставление диаграмм распределения среднего нормального давления или показателя напряженного состояния с распределением степени деформации сдвига.

Если вернуться к диаграмме (рис. 1), то можно отметить высокий уровень степени деформации сдвига в поверхностном слое трубы на уровне калибрующего пояса матрицы, здесь максимальное значение параметра равно 5,484. Показатель напряженного состояния в этом месте (рис. 5) близок к нулю, поскольку в зоне калибрующего пояса появляются поверхности, свободные от действия напряжений. В остальных зонах очага деформации напряжения окажутся сжимающими, что повышает пластичность металла. Таким образом, при прессовании трубы из алюминиевого сплава с заданными геометрическими параметрами опасной с позиции разрушения зоной является место выхода металла из отверстия матрицы.

Заключение

В работе показана возможность решения задачи прессования трубы из алюминиевого сплава с использованием отечественного программного продукта РАПИД-2D. В том числе построены поля распределения компонентов тензора деформации, степени деформации, показателя напряженного состояния. Сделан вывод о преобладающем влиянии радиальной компоненты тензора деформации на распределение степени деформации в продольном сечении готового изделия. Наиболее опасной с позиции трещинообразования является зона выхода металла из отверстия матрицы.

Список литературы

1. Giarnas E., Tzetzis, D. Optimization of die design for extrusion of 6xxx series aluminum alloys through finite element analysis: a critical review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 119. P. 5529–5551.
2. Wu Y.-Q., Wang K.-K. The ultra-high temperature forging process based on DEFORM-3D simulation // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2022. Vol. 16, Is. 1. P. 99–108.
3. De Moraes Costa A.L., Da Silva U.S., Valberg H.S. On the Friction Conditions in FEM Simulations of Cold Extrusion // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47. P. 231–236.
4. Логинов Ю.Н., Овчинников А.С. Моделирование поведения металла вблизи поверхности пресс-шайбы // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2021. № 1. С. 22–25.
5. Mahmoodkhani Y., Wells M.A., Poole W.J., Grajales L., Parson N. The Development of Grain Structure During Axisymmetric Extrusion of AA3003 Aluminum Alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2015. Vol. 46. P. 5920–5932.
6. Полищук Е.Г., Жиров Д.С., Вайсбурд Р.А. Система расчета пластического деформирования РАПИД // *Кузнечно-штамповочное производство*. 1997. № 8. С. 16–19.
7. Логинов Ю.Н., Полищук Е.Г., Овчинников А.С. Напряженно-деформированное состояние прессования латуни при переменных условиях теплопередачи // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2018. № 9. С. 41–46.
8. Логинов Ю.Н., Полищук Е.Г., Тугбаев Ю.В. Особенности моделирования процесса прессования труб из сплавов на основе циркония // *Цветные металлы*. 2018. № 9. С. 82–87.
9. Муратов В.С., Морозова Е.А. Развитие процессов рекристаллизации в прессованных полуфабрикатах из алюминиевых сплавов // *Современные проблемы науки и образования*. 2008. № 8. С. 56–57.
10. Логинов Ю.Н., Илларионов А.Г. Неравномерность структуры прессованных труб из алюминиевого сплава АМг6 // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2013. № 6. С. 35–40.
11. Захаров В.В. Структурное упрочнение алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2011. № 4. С. 18–24.
12. Хина Б.Б., Покровский А.И., Shi-Hong Zhang, Yong Xu, Da-Yong Chen, Марышева А.А. Влияние скорости деформации на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава AA2B06-О системы Al-Cu-Mg // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27, №. 4. С. 59–69.