



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Инвариантные показатели напряженного состояния при кузнечной осадке магния в оболочке

Юрий Логинов^{1, 2, а, *}, Юлия Замараева^{1, 2, б}

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>,  zamaraevajulia@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.01

История статьи:

Поступила: 12 января 2021

Рецензирование: 25 января 2021

Принята к печати: 13 февраля 2021

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Магний

Пластичность

Осадку

Показатель напряженного состояния

Коэффициент Лоде

Метод конечных элементов

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90051.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обработки давлением малопластичных металлов приходится разрабатывать специальные приемы повышения пластичности. В холодном состоянии повышение пластических свойств возможно за счет повышения уровня сжимающих напряжений в процессе деформации. В процессах кузнечной осадки это достигается применением оболочек или обойм различного вида. При этом конфигурация инструмента для осадки тоже имеет значение. Для создания дополнительных напряжений сжатия и повышения пластичности металла рабочую поверхность инструмента можно конфигурировать иначе, чем при обычной свободной осадке, где она заведомо больше площади контактной поверхности заготовки, чтобы могло происходить уширение металла. Напряженное состояние оказывает большое влияние на пластичность обрабатываемого материала. Это состояние описывается методами тензорного представления, но для оценки ситуации принято применять инварианты тензоров в том или ином виде, что устраняет влияние координат на результаты анализа. В разделах механики деформируемого тела, касающихся влияния напряженного состояния на пластичность, используют первый, но иногда и другие инварианты тензора напряжений, сами инварианты трансформированы в показатель напряженного состояния и коэффициент Лоде. **Цель работы:** математическая оценка инвариантных показателей напряженного состояния процесса осадки магния при комнатной температуре, по результатам которых удалось получить положительный результат в условиях реальных экспериментов. **Методы исследования:** конечно-элементное моделирование с помощью программного модуля DEFORM. **Результаты и обсуждение.** Выполнено теоретическое обоснование повышения пластичности магниевой заготовки в процессе осадки в обойме без ее обжатия. Выявлено повышение показателя напряженного состояния по модулю в 2...5 раз, что способствует повышению пластичности металла. В то же время выявлена зона с коэффициентом Лоде, близким к нулю. Она прилегает к середине высоты заготовки в месте контакта с обоймой и может являться опасным сечением с позиции возникновения трещинообразования.

Для цитирования: Логинов Ю.Н., Замараева Ю.В. Инвариантные показатели напряженного состояния при кузнечной осадке магния в оболочке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 79–88. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-79-88.

Введение

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением необходимо учитывать пластические свойства металла. Для малопластичных металлов приходится разрабатывать специальные приемы повышения пластичности. В основном усилия направлены на

повышение уровня пластических свойств за счет повышения температуры. Однако такой подход не всегда устраивает разработчиков технологии, поскольку ряд металлов при повышении температуры начинает окисляться с поверхности либо происходит процесс газонасыщения металла и в его объеме. Особенно это характерно для таких металлов, как титан [1] и магний [2]. Поэтому может иметь место и такой подход, в котором обработка осуществляется в холодном состоянии, а пластичность увеличивается за счет повышения уровня сжимающих напряжений [3] в процессе деформации.

*Адрес для переписки

Замараева Юлия Валентиновна, м.н.с.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,

ул. Софьи Ковалевской, 18,

620137, г. Екатеринбург, Россия

Тел.: +7-950-200-56-79, e-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

В процессах кузнечной осадки это достигается применением оболочек или обойм различного вида [4–6]. При этом конфигурация инструмента для осадки тоже имеет значение. Например, при обычной свободной осадке инструмент имеет рабочую поверхность, площадь которой заведомо больше площади контактной поверхности заготовки, чтобы могло происходить уширение металла. Здесь процессу деформации препятствуют только напряжения трения, создающие дополнительные радиальные и тангенциальные напряжения, повышающие гидростатическое давление. Однако рабочую поверхность можно конфигурировать иначе, что создаст дополнительные напряжения сжатия и будет повышена пластичность металла. Сочетание заготовки и оболочки создает конфигурацию биметалла, из-за этого приходится применять сложные варианты решения краевых задач, которые в последнее время решаются все чаще методом конечных элементов [7].

Напряженное состояние оказывает большое влияние на пластичность обрабатываемого материала. Это состояние описывается методами тензорного представления, но для оценки ситуации принято применять инварианты тензоров в том или ином виде, что устраняет влияние координат на результаты анализа. В разделах механики деформируемого тела, касающихся влияния напряженного состояния на пластичность, используют первый, но иногда и другие инварианты тензора напряжений [8], сами инварианты трансформированы в показатель напряженного состояния [9, 10] и коэффициент Лоде [11, 12].

Применение оболочки в более ранних исследованиях процесса осадки было связано с применением схемы воздействия рабочего инструмента одновременно на торец заготовки и на торец оболочки. Другая более новая схема, по которой инструмент воздействует лишь на торец заготовки, была опробована только экспериментально [13], при этом удалось получить магниевую заготовку без разрушения и трещин. Известно, что за повышение пластичности металла в процессах пластической деформации отвечают инварианты тензора напряжений.

Целью работы является математическая оценка инвариантных показателей напряженного состояния процесса осадки магния в оболочке при воздействии инструмента только на торец заготовки.

Методика исследований

Экспериментальная часть

Физические эксперименты выполнены на кузнечно-прессовом оборудовании института физики металлов УрО РАН, их подробное описание изложено в ряде публикаций [13–15]. Во избежание самоцитирования ниже изложена только сущность процесса. В качестве материала заготовки применили магний марки Mg90 по ГОСТ 804–93. В эксперименте приняты следующие размеры: заготовка в форме цилиндра из магния диаметром 21,8 мм и высотой 25 мм, медная обойма имеет наружный диаметр 48 мм и высоту 29,5 мм, внутренний диаметр обоймы равен диаметру магниевой заготовки. Осадку осуществляли пуансонами диаметром 25 мм. Абсолютное обжатие составило величину 5,9 мм. Диаметр обоймы увеличился до 49,8...50,2 мм на контакте с бойками и до 52,9...53,2 мм в средней части. В экспериментах по этой схеме не выявлено разрушение металла заготовки. В то же время при обычной осадке заготовка разрушалась.

Расчетная часть

В данной работе речь идет о вычислительном эксперименте – оценке напряженно-деформированного состояния процесса деформации, реализация которого позволила сообщить определенный уровень деформации магниевым заготовкам в холодном состоянии. Такая оценка выполнена методом конечных элементов с помощью программного модуля DEFORM [16]. Задачей является определение условий отсутствия трещинообразования, т. е. разрушения металла. Далее будут использованы основы теории разрушения, изложенные, например, в книге [17]. Разрушение наступает при превышении предельной степени деформации сдвига Λ_p , которая, в свою очередь, зависит от показателя напряженного состояния σ/T и коэффициента Лоде μ_σ , здесь σ – среднее (гидростатическое) напряжение, T – интенсивность касательных напряжений, связанная с интенсивностью напряжений σ_i соотношением

$$T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}. \quad (1)$$

Показатель μ_σ определяется соотношением

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (2)$$

где σ_i ($i = 1, 2, 3$) – главные нормальные напряжения, при этом напряжения ранжированы по правилу $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, т. е. нумерация начинается максимальным напряжением и заканчивается минимальным.

Системой DEFORM предусмотрена возможность расчета максимального (первого) и минимального (третьего) главных нормальных напряжений, однако второе главное напряжение не рассчитывается. Поэтому его определили специально расчетом по формуле

$$\sigma_2 = 3\sigma - (\sigma_1 + \sigma_3). \quad (3)$$

Одна из других проблем – отсутствие в перечне переменных, рассчитываемых в системе DEFORM: показателя напряженного состояния σ/T и коэффициента Лоде μ_σ , их рассчитывали специально и приводили к табличному виду.

В схеме холодной осадки магниевой заготовки для достижения более высокой пластичности было предложено применить оболочку и изменить конфигурацию поверхности инструмента [18]. Отличие от обычных схем применения оболочки заключается в том, что оболочка больше по высоте, чем заготовка, а пуансон воздействует не в целом на сборку, а только на заготовку (рис. 1, а). В качестве материала оболочки использована медь, ее свойства описаны с использованием справочных материалов.

Постановка задачи включала в себя описание физических и пластических свойств на основе справочных данных, а задание граничных условий – в перемещениях. Использовали модель

изотропной среды с упрочнением, которая описана в статье [19].

Установлены взаимодействия на контактных поверхностях: заготовка – бойки, заготовка – оболочка. На контакте с инструментом задан закон трения по Кулону с коэффициентом трения 0,1, поскольку осадку осуществляли со смазкой. На границе между заготовкой и обоймой смазка отсутствует, и поскольку оба материала – медь и магний – обладают повышенными адгезионными свойствами, то коэффициент трения на этой поверхности приняли равным 0,5.

Результаты и их обсуждение

Параметр σ/T не входит в число определяемых программным модулем DEFORM так же, как и параметр T . Для дополнительных расчетов пришлось назначить контрольные точки P1, ..., P9, установив относительные координаты $z/h = 0; 0,5; 1; r/R = 0; 0,5; 1$. Здесь z и r – текущие координаты по радиусу и вертикальной оси; h и R – половина высоты и радиус заготовки. В этих точках выполнена оценка значений параметра stress mean, которые соответствуют понятию среднего напряжения (рис. 1, б), и параметра stress effective, которые соответствуют понятию интенсивности напряжений σ_{ii} (рис. 2).

Естественно, что в оболочке действуют преимущественно растягивающие средние напряжения до +102 МПа (рис. 1, б), их наличие создает опасность разрушения, именно поэтому здесь использован такой пластичный материал,

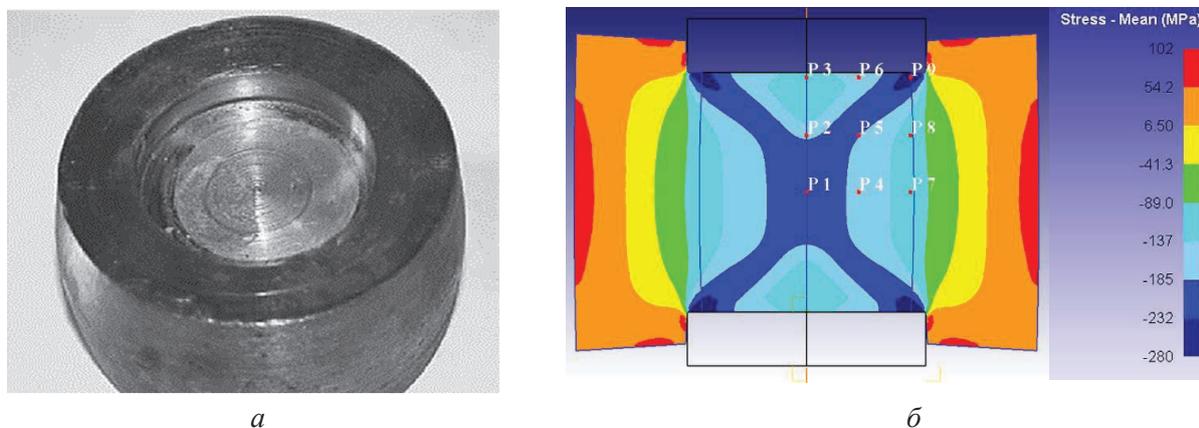


Рис. 1. Фото сборки (а) и расчетная модель процесса (б) осадки магниевой заготовки в оболочке с оценкой средних напряжений (stress mean)

Fig. 1. Photo of the assembly (a) and calculation model of the process (b) upsetting of a magnesium billet in a shell with an estimation of mean stresses (stress mean)

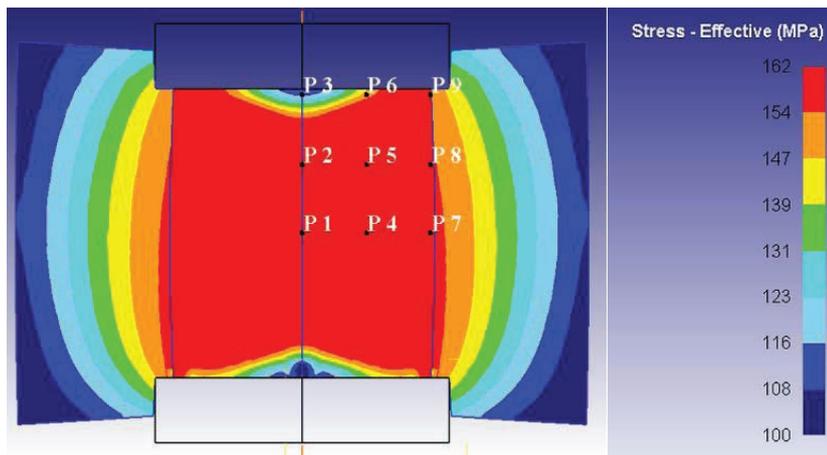


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений

Fig. 2. The distribution of stress intensity

как медь. Распределение средних напряжений в магниевой заготовке напоминает картину «ковочного креста», известного из теорииковки. Здесь зона повышенных (по модулю) значений вытянута вдоль диагоналей по продольному сечению заготовки с достижением напряжения – 280 МПа. При обычной ковке как раз вдоль линий «ковочного креста» возможен раскол заготовки. В данном случае наличие высоких (по модулю) значений среднего нормального напряжения позволяет надеяться на увеличение уровня пластичности, что должно предотвратить разрушение.

Иная картина наблюдается для распределения интенсивности напряжений (рис. 2): они уменьшаются от центра к периферии, т. е. по направлению к свободной поверхности. Градиент напряжений особенно велик на границе раздела заготовки и оболочки, что объясняется различием в механических свойствах материалов. В зонах затрудненной деформации, примыкающих к центрам торцов пуансонов, интенсивность напряжений падает, что обусловлено отсутствием упрочнения металла в этой области.

Расчетные данные по показателю напряженного состояния в контрольных точках P1-P9 представлены в табл. 1.

Поскольку пластичность металлов уменьшается с увеличением показателя σ/T , то из таблицы следует, что опасные зоны прилегают к точкам с координатами $z/h = 0$ и $r/R = 1$. Вместе с тем значения σ/T везде имеют отрицательные значения, т. е. преобладают напряжения сжатия. Из таблицы видно, что показатель σ/T может

варьироваться на этой стадии обработки в пределах $-1,21 \dots -3,02$. Наибольшие по модулю значения на уровне $-3,02$ характерны для периферийных точек, прилегающих к контактной поверхности. При этом неблагоприятные (наименьшие по модулю) значения находятся в районе выпуклости боковой поверхности. Возможно сравнение полученных результатов с результатами осадки цилиндрической заготовки на гладких бойках без трения. Как известно, в этом случае показатель напряженного состояния по всему объему заготовки одинаков и равен величине $-0,58$. При сравнении

этого значения с результатами, отраженными в таблице, мы видим, что произошло увеличение показателя по модулю в $2 \dots 5$ раз. Именно поэтому пластичность металла в опытах возросла и ее оказалось достаточно для осуществления операции осадки без разрушения.

Возможно также сравнение полученных результатов с вариантом осадки с трением цилиндрической заготовки в обойме с расположением всей сборки на контактной поверхности бойков. Такой вариант приводит к большей величине перемещения металла в зоне возникновения выпуклости боковой поверхности [20] и отходу оболочки от заготовки. При отсутствии подпора и образовании выпуклой поверхности средние нормальные напряжения в этой зоне могут перейти из области сжимающих в область растягивающих. Боковая поверхность заготовки при недостаточно высокой пластичности может разрушаться. Поэтому желательно, чтобы обойма не подвергалась действию осевых напряжений.

Распределение максимальных и минимальных главных напряжений отображено на рис. 3.

Таблица 1

Table 1

Показатель σ/T в контрольных точках P1–P9
Value of σ/T at P1–P9 control points

z/h	r/R		
	0	0,5	1
1	-1,99	-1,75	-3,02
0,5	-1,86	-2,01	-1,24
0	-2,15	-1,83	-1,21

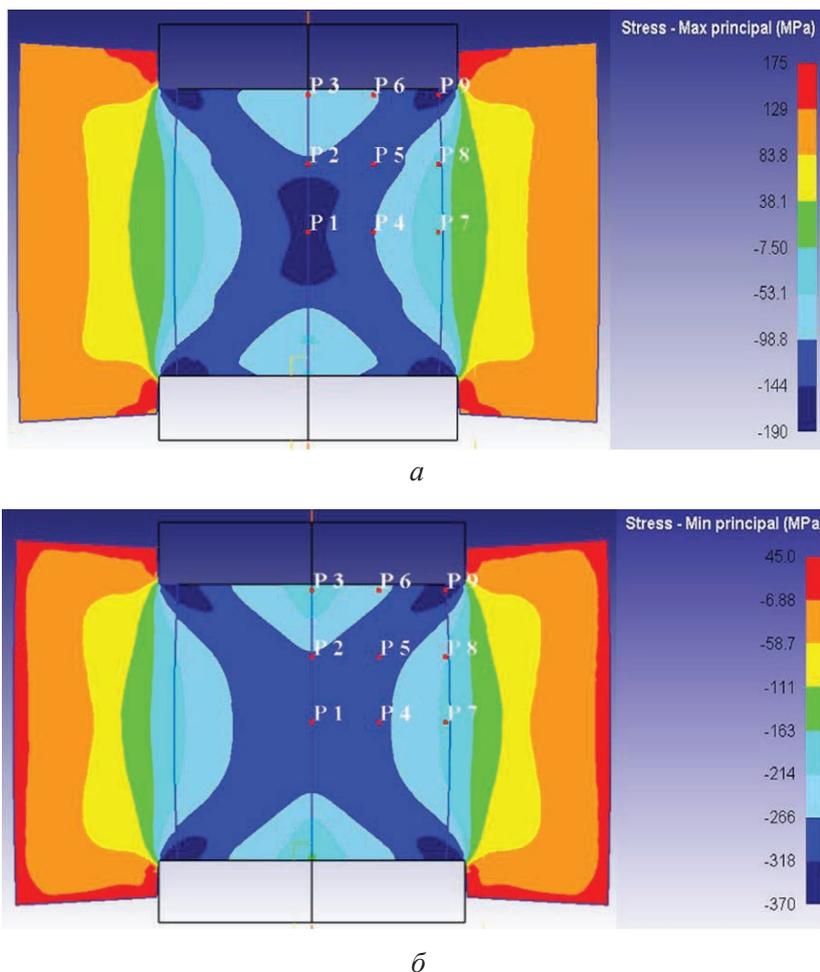


Рис. 3. Распределение максимального (а) и минимального (б) главного напряжения

Fig. 3. Distribution of the maximum (a) and minimum (б) principal stress

Видно, что схема ковочного креста повторяется и для главных напряжений. После расчета второго главного напряжения удалось рассчитать коэффициент μ_σ . Результаты расчетов главных нормальных напряжений приведены в табл. 2.

Видно, что все главные напряжения являются отрицательными величинами, т. е. они являются напряжениями сжатия. Опасность с позиции возможности разрушения представляют контрольные точки с наименьшими по модулю главными напряжениями. В их число входит точка P7

Таблица 2
Table 2

Главные нормальные напряжения (МПа) и коэффициент Лоде $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 / \mu_\sigma$ при относительных координатах

Principal normal stresses (MPa) and Lode coefficient $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 / \mu_\sigma$ at relative coordinates

z/h	r/R		
	0	0,5	1
1	-92/-92/-205/0,98	-95/-106/-248/0,86	-190/-262/-370/0,2
0,5	-119/-118/-279/0,98	-118/-153/-293/0,60	-39/-90/-219/0,43
0	-148/-148/-310/1,00	-104/-138/-280/0,61	-23/-111/-208/0,05

с координатами $z/h = 0$; $r/R = 1$, здесь $\sigma_1 = -23$ МПа. В этой же точке достигнуто значение коэффициента Лоде, близкое к нулю, в отличие от точек, расположенных на оси заготовки, где этот коэффициент близок к единице. При нулевом значении коэффициента Лоде пластичность оказывается самой низкой, на что указывает ряд работ [21, 22]. Поэтому указанную область можно считать опасным сечением с позиции трещинообразования.

Как видно из всех приведенных выше иллюстраций и результатов реального эксперимента, в исследуемом способе осадки не происходит отхода оболочки от заготовки. На протяжении всего процесса осадки на боковую поверхность заготовки действуют радиальные напряжения сжатия, повышающие пластичность металла и позволяющие провести деформацию без разрушения.

Заключение

Расчетами напряженно-деформированного состояния показано, что осадка магния в оболочке при воздействии прессового инструмента только на торец заготовки должна приводить к повышению пластичности металла, что ранее было показано экспериментально.

Выявлено повышение показателя напряженного состояния по модулю в 2...5 раз при сравнении его с показателем напряженного состояния при обычной осадке. При этом выявлена зона с коэффициентом Лоде, близким к нулю. Она прилегает к середине высоты заготовки в месте контакта с обоймой и может являться опасным сечением с позиции возникновения трещинообразования.

Список литературы

1. Kudiiarov V.N., Lider A.M., Harchenko S.Y. Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 68–73. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.68.
2. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion / M. Esmaily, J.E. Svensson, S. Fajardo, N. Birbilis, G.S. Frankel, S. Virtanen, R. Arrabal, S. Thomas, L.G. Johansson // *Progress in Materials Science*. – 2017. – Vol. 89. – P. 92–193. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.04.011.

3. Proust G. Processing magnesium at room temperature // *Science*. – 2019. – Vol. 364 (6448). – P. 30–31. – DOI: 10.1126/science.aax9732.

4. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion / L.L. Chang, Y.N. Wang, X. Zhao, J.C. Huang // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 496, iss. 1–2. – P. 512–516. – DOI: 10.1016/j.msea.2008.06.015.

5. Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Замараева Ю.В. Межслоиное взаимодействие при осадке биметаллической заготовки // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2019. – № 7. – С. 41–45.

6. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets / F. Pan, Q. Wang, B. Jiang, J. He, Y. Chai, J. Xu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 655. – P. 339–345. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.098.

7. Khanawapee U., Butdee S. A study of barreling and DEFORM 3D simulation in cold upsetting of bi-material // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 26, pt. 2. – P. 1262–1270. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.252.

8. Malcher L., Mamiya E.N. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – Vol. 56. – P. 232–261. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.002.

9. Asymmetric yield function based on the stress invariants for pressure sensitive metals / J.W. Yoon, Y. Lou, J. Yoon, M.V. Glazoff // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – Vol. 56. – P. 184–202. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.11.008.

10. Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys / L. Driemeier, G. Micheli, M. Alves, M. Brünig // *Mechanics of Materials*. – 2010. – Vol. 42, iss. 2. – P. 207–217. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.11.012.

11. Effect of the lode parameter in predicting shear cracking of 2024-t351 aluminum alloy Taylor rods / X. Xiao, Z. Mu, H. Pan, Y. Lou // *International Journal of Impact Engineering*. – 2018. – Vol. 120. – P. 185–201. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.06.008.

12. Mirone G., Corallo D. A local viewpoint for evaluating the influence of stress triaxiality and lode angle on ductile failure and hardening // *International Journal of Plasticity*. – 2010. – Vol. 26, iss. 3. – P. 348–371. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.07.006.

13. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Волков А.Ю. Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым

подпором // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 9. – С. 15–22.

14. Получение, структура, текстура и механические свойства сильно деформированных образцов магния / А.Ю. Волков, О.В. Антонова, Б.И. Каменецкий, И.В. Клюкин, Д.А. Комкова, Б.Д. Антонов // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 5. – С. 538–548. – DOI: 10.1134/S0031918X16050161.

15. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Кругликов Н.А. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке // Технология легких сплавов. – 2012. – № 1. – С. 86–92.

16. Design Environment for forming: website. – 2021. – URL: <http://www.DEFORM.com> (accessed: 08.02.2021).

17. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 2001. – 834 с.

18. Логинов Ю.Н., Замираева Ю.В., Каменецкий Б.И. Осадка цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке без ее обжата // Цветные металлы. – 2020. – № 4. – С. 77–82. – DOI: 10.17580/tsm.2020.04.09.

19. Комкова Д.А., Волков А.Ю. Структура и текстура магния после низкотемпературной мегапластической деформации // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2017. – № 3 (41). – С. 70–75.

20. Narayanasamy R., Pandey K.S. Phenomenon of barrelling in aluminium solid cylinders during cold upset-forming // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 70, iss. 1–3. – P. 17–21. – DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00035-6.

21. Ganjiani M. A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle // European Journal of Mechanics – A/Solids. – 2020. – Vol. 84. – P. 104048. – DOI: 10.1016/j.euromechsol.2020.104048.

22. Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В. Комплекс испытаний для исследования влияния напряженного состояния на предельную пластичность металла при повышенной температуре // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 3. – С. 146–164. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.11.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Invariant stress state parameters for forging upsetting of magnesium in the shell

Yuriy Loginov^{1, 2, a, *}, Yuliya Zamaraeva^{1, 2, b}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskaya str., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>, j.n.loginov@urfu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>, zamaraevajulia@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 January 2021

Revised: 25 January 2021

Accepted: 13 February 2021

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Magnesium

Plasticity

Upsetting

Value of the stress state

Lode coefficient

Finite element method

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-38-90051.

ABSTRACT

Introduction. For pressure treatment of low-plastic metals, it is necessary to develop special techniques for increasing plasticity. In the cold state, an increase in plastic properties is possible due to an increase in the level of compressive stresses during deformation. In the processes of forging precipitation, this is achieved by using shells or clips of various types. At the same time, the configuration of the precipitation tool also matters. To create additional compressive stresses and increase the ductility of the metal, the working surface of the tool can be configured differently than with a normal free draft, where it is obviously larger than the contact surface area of the workpiece, so that metal broadening can occur. The stress state has a great influence on the plasticity of the processed material. This state is described by methods of tensor representation, but to assess the situation, it is customary to use invariants of tensors in one form or another, which eliminates the influence of coordinates on the results of the analysis. In the sections of deformable body mechanics dealing with the influence of the stress state on plasticity, the first, but sometimes other invariants of the stress tensor are used, the invariants themselves are transformed into the stress state indicator and the lode coefficient. **The aim of the work:** mathematical evaluation of invariant parameters of the stress state of the magnesium precipitation process at room temperature, according to the results of which it is possible to obtain a positive result in real experiments. **Research methods:** finite element simulation using the DEFORM software module. **Results and discussion.** The theoretical justification of increasing the plasticity of the magnesium billet in the process of precipitation in the cage without its compression is carried out. An increase in the stress state index modulo 2...5 times is revealed, which contributes to an increase in the plasticity of the metal. At the same time, a zone with a lode coefficient close to zero is identified. It is adjacent to the middle of the height of the workpiece at the point of contact with the cage and can be a dangerous cross-section from the position of crack formation.

For citation: Loginov Yu.N., Zamaraeva Yu.V. Invariant stress state parameters for forging upsetting of magnesium in the shell. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 79–88. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-79-88. (In Russian).

References

1. Kudiiarov V.N., Lider A.M., Harchenko S.Y. Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 68–73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.68.
2. Esmaily M., Svensson J.E., Fajardo S., Birbilis N., Frankel G.S., Virtanen S., Arrabal R., Thomas S., Johansson L.G. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion. *Progress in Materials Science*, 2017, vol. 89, pp. 92–193. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.04.011.

* Corresponding author

Zamaraeva Yuliya V., Junior researcher

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

18 S. Kovalevskaya str.,

620137, Ekaterinburg, Russian Federation

Tel.: +7-950-200-56-79, e-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

3. Proust G. Processing magnesium at room temperature. *Science*, 2019, vol. 364 (6448), pp. 30–31. DOI: 10.1126/science.aax9732.
4. Chang L.L., Wang Y.N., Zhao X., Huang J.C. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 496, iss. 1–2, pp. 512–516. DOI: 10.1016/j.msea.2008.06.015.
5. Loginov Yu.N., Kamenetsky B.I., Zamaraeva Yu.V. Mezhsloinoe vzaimodeistvie pri osadke bimetallicheskoj zagotovki [Interlayered interaction in the upsetting of the bimetallic billets]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2019, no. 7, pp. 41–45.
6. Pan F., Wang Q., Jiang B., He J., Chai Y., Xu J. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 655, pp. 339–345. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.098.
7. Khanawapee U., Butdee S. A study of barreling and DEFORM 3D simulation in cold upsetting of bi-material. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, pt. 2, pp. 1262–1270. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.252.
8. Malcher L., Mamiya E.N. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant. *International Journal of Plasticity*, 2014, vol. 56, pp. 232–261. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.002.
9. Yoon J.W., Lou Y., Yoon J., Glazoff M.V. Asymmetric yield function based on the stress invariants for pressure sensitive metals. *International Journal of Plasticity*, 2014, vol. 56, pp. 184–202. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.11.008.
10. Driemeier L., Micheli G., Alves M., Brünig M. Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys. *Mechanics of Materials*, 2010, vol. 42, iss. 2, pp. 207–217. DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.11.012.
11. Xiao X., Mu Z., Pan H., Lou Y. Effect of the lode parameter in predicting shear cracking of 2024-t351 aluminum alloy Taylor rods. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 120, pp. 185–201. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.06.008.
12. Mirone G., Corallo D. A local viewpoint for evaluating the influence of stress triaxiality and lode angle on ductile failure and hardening. *International Journal of Plasticity*, 2010, vol. 26, iss. 3, pp. 348–371. DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.07.006.
13. Kamenetsky B.I., Loginov Yu.N., Volkov A.Yu. Metody i ustroystva dlya povysheniya plastichnosti khrupkikh materialov pri kholodnoi osadke s bokovym podporom [Methods and apparatus for increase of brittle materials plasticity under cold upsetting with lateral support]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking productions in mechanical engineering*, 2013, no. 9, pp. 15–22.
14. Volkov A.Yu., Antonova O.V., Kamenetskii B.I., Klyukin I.V., Komkova D.A., Antonov B.D. Poluchenie, struktura, tekstura i mekhanicheskie svoystva sil'no deformirovannykh obraztsov magniya [Production, structure, texture, and mechanical properties of severely deformed magnesium]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, iss. 5, pp. 518–528. DOI: 10.1134/S0031918X16050161. (In Russian).
15. Kamenetsky B.I., Loginov Yu.N., Kruglikov N.A. Vliyanie uslovii bokovogo podpora na plastichnost' magniya pri kholodnoi osadke [The effect of lateral back pressure conditions on magnesium plasticity during cold upsetting]. *Tekhnologiya legkikh splavov = Technology of light alloys*, 2012, no. 1, pp. 86–92.
16. Design Environment for forming: website. 2021. Available at: <http://www.DEFORM.com> (accessed 08.02.2021).
17. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal processing by pressure]. Ekaterinburg, Ural State Technical University Publ., 2001. 834 p.
18. Loginov Yu.N., Zamaraeva Yu.V., Kamenetskiy B.I. Osadka tsilindricheskoj magnievoi zagotovki v mednoi obolochke bez ee obzhatiya [Upsetting of cylinder magnesium blanks in copper casing without compression]. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 4, pp. 77–82. DOI: 10.17580/tsm.2020.04.09. (In Russian).
19. Komkova D.A., Volkov A.Yu. Struktura i tekstura magniya posle nizkotemperaturnoi megaplasticheskoj deformatsii [Magnesium structure and texture after the low-temperature megaplastic deformation]. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta = Science Vector of Togliatti State University*, 2017, no. 3 (41), pp. 70–75.

20. Narayanasamy R., Pandey K.S. Phenomenon of barrelling in aluminium solid cylinders during cold upset-forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 70, iss. 1–3, pp. 17–21. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00035-6.

21. Ganjiani M. A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 2020, vol. 84, p. 104048. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2020.104048.

22. Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Nesterenko A.V. Kompleks ispytaniy dlya issledovaniya vliyaniya napryazhennogo sostoyaniya na predel'nyuyu plastichnost' metalla pri povyshennoi temperature [A set of tests for studying the effect of the stress state on ultimate metal plasticity at high temperature]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika = PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, vol. 3, pp. 146–164. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.11.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).