

## АНАЛИЗ СХЕМЫ НЕРАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОЛУЧЕНИЮ ЛИСТОВОГО МАГНИЯ В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ

© 2019 г. **Ю.Н. Логинов, А.Ю. Волков, Б.И. Каменецкий**

Уральский федеральный университет (УрФУ)  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург  
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

*Статья поступила в редакцию 25.05.18 г., доработана 02.07.18 г., подписана в печать 05.07.18 г.*

Выполнена оценка схем деформации прокатки, равноканального углового прессования и неравноканального углового прессования. Отмечено, что при прокатке затруднителен перевод заготовки круглого сечения в прямоугольное сечение с малой толщиной. Эту проблему не удастся решить также применением равноканального углового прессования. В связи с этим предложено применять для проработки литой структуры магния схему неравноканального углового прессования. Описана методика эксперимента, основанная на холодном выдавливании цилиндров диаметром 42 мм и высотой 40 мм. Полоса на выходе имела ширину 40 мм и толщину 1 мм. Определенное через соотношение площадей относительное обжатие материала заготовки составило 96 % при коэффициенте вытяжки 17. Удельные давления на пуансоне в начале процесса выдавливания составляли 1200–1300 МПа, а усилие выдавливания находилось в пределах 1670–1800 кН. Листовую заготовку разрезали на мерные длины, которые прокатывали при комнатной температуре в фольги толщиной 50 и 10 мкм без промежуточных отжигов. Прокатку осуществляли на стане Дуо с относительными обжатиями 12–20 % при средней скорости 0,1 м/с. Для изготовления фольги толщиной 50 мкм было выполнено 20 проходов с суммарным относительным обжатием 95 %. Результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов показали, что постоянное значение степени деформации достигается на довольно значительном расстоянии от переднего торца, которое оценено как 50-кратная толщина полосы. С помощью расчета поля скоростей деформации определена конфигурация очага деформации. Проведена оценка энергетических затрат. В результате выполненного комплекса расчетных и экспериментальных работ было установлено следующее: за одну операцию при комнатной температуре удастся изготовить из цилиндрической литой магниевой заготовки тонкую листовую заготовку, которая обладает уровнем пластичности, достаточным для последующей листовой прокатки. Полученная в предлагаемом процессе листовая заготовка имеет высокий уровень проработки пластической деформацией, что создается за счет схемы формоизменения с наличием высокого уровня деформаций удлинения и сдвига. Несмотря на высокий уровень давлений, которые приходится применять для создания схемы всестороннего сжатия, с учетом отсутствия необходимости нагрева заготовки, энергетические затраты оказываются не выше, чем в традиционных процессах обработки.

**Ключевые слова:** литой магний, холодная обработка, угловое прессование, сжимающие напряжения, пластическая деформация, метод конечных элементов.

**Логинов Ю.Н.** — докт. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением Института новых материалов и технологий УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28), ст. науч. сотр. Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (ИФМ УрО РАН) (620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18).  
E-mail: j.n.loginov@urfu.ru.

**Волков А.Ю.** — докт. техн. наук, зав. лабораторией прочности ИФМ УрО РАН. E-mail: volkov@imp.uran.ru.

**Каменецкий Б.И.** — канд. техн. наук, вед. науч. сотр. лаборатории прочности ИФМ УрО РАН.  
E-mail: kamenetski@imp.uran.ru.

**Для цитирования:** Логинов Ю.Н., Волков А.Ю., Каменецкий Б.И. Анализ схемы неравноканального углового выдавливания применительно к получению листового магния в холодном состоянии. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 1. С. 59–66. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-59-66.

*Loginov Yu.N., Volkov A.Yu., Kamenetsky B.I.*

### **Analysis of non-equal-channel angular pressing scheme applied for obtaining magnesium sheet in cold state**

Deformation patterns of rolling, equal-channel angular pressing and non-equal-channel angular pressing were evaluated. It is noted that when rolling, it is difficult to transfer a circular section preform into a rectangular section with a small thickness. This problem cannot be solved using equal-channel angular pressing. In connection with this, it is proposed to use a non-equal-channel angular

pressing pattern to study the cast structure of magnesium. An experimental procedure based on cold extrusion of cylinders with a diameter of 42 mm and a height of 40 mm is described. The strip at the outlet was 40 mm in width and 1 mm in thickness. The percentage reduction of the preform material determined by the ratio of areas was 96 % with a draw ratio of 17. The specific pressures on the punch at the beginning of the extrusion process were 1200–1300 MPa, and extrusion force was 1670–1800 kN. The preform was cut into lengths that were rolled at a room temperature into 50 and 10  $\mu\text{m}$  thick foils without intermediate annealing. Rolling was carried out on the Duo mill with a percentage reduction of 12–20 % at an average speed of 0,1 m/s. 20 passes were performed with a total relative reduction of 95 % to make the 50  $\mu\text{m}$  thick foil. The results of computer simulation by the finite element method demonstrated that the constant value of the deformation degree is achieved at a rather considerable distance from the front end estimated as 50 times the thickness of the strip. The deformation rate field was calculated to determine the configuration of the deformation center. Energy costs were estimated. As a result of the completed set of calculated and experimental work, it was possible to establish the following — it is possible to produce a thin sheet preform from a cylindrical cast magnesium blank in one operation at a room temperature. The sheet blank has a level of ductility sufficient for subsequent sheet rolling. The sheet blank obtained in the proposed process has a high level of plastic deformation elaboration created due to the forming pattern with the high level of elongation and shear deformation. Despite the high level of pressure that must be applied to create a comprehensive compression scheme taking into account the lack of the need to heat the preform, energy costs are no higher than in traditional treatment processes.

**Keywords:** cast magnesium, cold treatment, angular pressing, compressive stresses, plastic deformation, finite element method.

**Loginov Yu.N.** — Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of pressure treatment of metals of the Institute of New Materials and Technologies of Ural Federal University (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 28), senior researcher of M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMP UB RAS) (620108, Russia, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18). E-mail: j.n.loginov@urfu.ru.

**Volkov A.Yu.** — Dr. Sci. (Tech.), head of Strength Laboratory of IMP UB RAS. E-mail: volkov@imp.uran.ru.

**Kamenetsky B.I.** — Cand. Sci. (Tech.), leading researcher of Strength Laboratory of IMP UB RAS.  
E-mail: kamenetski@imp.uran.ru.

**Citation:** Loginov Yu.N., Volkov A.Yu., Kamenetsky B.I. Analysis of non-equal-channel angular pressing scheme applied for obtaining magnesium sheet in cold state. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 1. P. 59–66 (In Russ.).

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-59-66.

## Актуальность проблемы и цель работы

Магний по своим запасам, по сравнению с другими металлами, широко распространен в земной коре и имеет меньшую плотность, чем алюминий и тем более железо, поэтому в последнее время предлагается все большее количество областей его применения — от аэрокосмической отрасли до мобильной телефонии [1, 2].

Традиционная технология изготовления тонкой листовой заготовки из магниевых сплавов подразумевает горячую пластическую деформацию слитка [3, 4], например плоской прокаткой [5, 6], что часто не спасает от появлений трещин на свободных поверхностях заготовок [7]. Метод горячей деформации, выбор которого обусловлен необходимостью повышения технологической пластичности магния и его сплавов [8], характеризуется следующими недостатками: большие затраты энергии, окисление, длительность цикла изготовления, значительное количество технологических и вспомогательных операций, отсутствие возможности получения мелкозернистой структуры и улучшенных свойств деформированных изделий.

При необходимости осуществления холодной деформации приходится прибегать к схемам, реализующим высокий уровень сжимающих напря-

жений [9, 10]. Пониженная пластичность объясняется особенностями механизмов пластической деформации магния, обладающего ГПУ-решеткой: при низких температурах обработки скольжение происходит только в базисных плоскостях. При увеличении температуры деформации задействуются и другие системы скольжения, в результате чего пластичность магния и его сплавов повышается [11, 12].

Авторами ряда работ предлагалось для проработки структуры магния и сплавов применять режим накопления пластической деформации [13, 14] — либо методом закручивания под давлением заготовок [15], либо методом равноканального углового прессования (РКУП) [16–18], однако последнее тоже за редким исключением [19] использовалось при повышенной температуре металла. Можно отметить, что одноразовое РКУП не приводит к существенному накоплению деформаций, которые к тому же распределяются неоднородно [20]. Еще одна особенность существующих технологий получения плоского магниевых проката состоит в том, что приходится отливать для последующей прокатки слябовую заготовку прямоугольного сечения. Более дешевый способ разлива-

ки — получение литой заготовки круглого сечения, но для ее превращения в слэб требуется довольно дорогая операция многоступенчатойковки (например, такую схему применяют в технологии производства плоского проката из титановых сплавов). Слябовые заготовки из магниевых сплавов обладают невысоким уровнем пластичности, поэтому приходится использовать дорогостоящий гомогенизирующий отжиг [21].

Целью настоящей работы является анализ схемы неравноканального углового выдавливания применительно к получению листового магния в холодном состоянии.

## Оценка схем деформации

Переход от одной схемы деформации к другой требует рассмотрения их достоинств и недостатков. На рис. 1, *а* изображена схема прокатки, традиционно применяемая для получения плоской заготовки. Заготовку 1 прямоугольного сечения обжимают валки 2 и 3, уменьшая ее толщину. Использование в этой схеме деформации круглой заготовки крайне нежелательно из-за малых разовых обжатий, что само по себе создает напряженное состояние с превалированием растягивающих напряжений; форма заготовки еще более ухудшает напряженное состояние, что провоцирует появление трещин.

На рис. 1, *б* показана схема РКУП, в которой круглая заготовка 4 помещается в полость контейнера 5 и выдавливается пуансоном 6 в пересекающийся канал того же сечения. Круглые заготовки применяют вследствие возмож-

ности изготовления их с наименьшими затратами. Наличие пересекающихся каналов равных диаметров позволяет повторять процесс деформации многократно с целью лучшей проработки структуры металла [22]. Определенный уровень деформации создается за счет наличия сдвигов на границе пересечения двух каналов. Однако форма конечного продукта остается круглой в поперечном сечении, и для перевода сечения в прямоугольное требуется использовать дополнительные методы обработки, что является недостатком.

На рис. 1, *в* отображена схема неравноканального углового прессования (НРКУП), в которой круглая заготовка 4 помещается в полость контейнера 5 и выдавливается пуансоном 6 в пересекающийся канал прямоугольного сечения. Здесь задача изменения формы решена в самом процессе прессования. К деформации сдвига, достигаемой на границе пересечения каналов, добавляется деформация, обеспечиваемая двумя дополнительными механизмами: за счет коэффициента вытяжки при уменьшении площади поперечного сечения и путем перевода круглого сечения в прямоугольное. Таким образом, вместо одного фактора, воздействующего на структуру металла в РКУП, в схеме НРКУП появляется целых три.

## Методика эксперимента

Заготовки в форме цилиндров диаметром 42 мм и высотой 40 мм изготавливали из чушки магния химического состава Mg90 по ГОСТ 804-93, выдерживая направление оси цилиндров вдоль столбчатой структуры зерен.

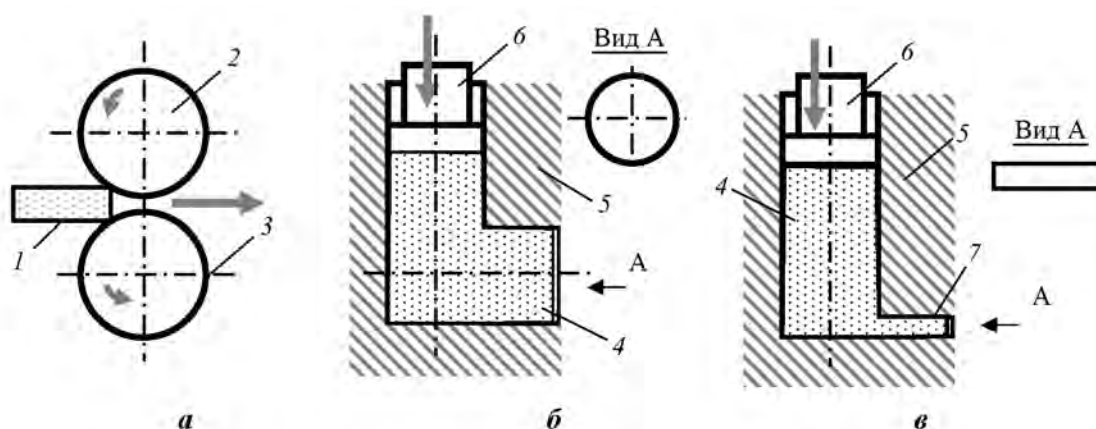


Рис. 1. Сравнение схем деформации прокаткой (*а*), РКУП (*б*) и НРКУП (*в*)

1 — слиток прямоугольного сечения; 2 и 3 — гладкие валки; 4 — круглая заготовка; 5 — контейнер; 6 — пуансон; 7 — канал прямоугольного сечения



**Рис. 2.** Микроструктура поверхности исходного листа (*а*), фольги толщиной 120 мкм (относительное обжатие 88 %) (*б*) и фольги толщиной 10 мкм (относительное обжатие 99 %) (*в*)

Торцы и боковую поверхность заготовок смазывали составом на основе смеси воска и дисульфида молибдена и устанавливали в канал контейнера по схеме, изображенной на рис. 1, *в*.

Полоса на выходе имела ширину 40 мм и толщину 1 мм. Определенное через соотношение площадей относительное обжатие материала заготовки составило 96 % при коэффициенте вытяжки 17. Удельные давления на пуансоне в начале процесса выдавливания находились в пределах 1200—1300 МПа, а усилие выдавливания — в диапазоне 1670—1800 кН.

Наличие больших удельных давлений до 1300 МПа говорит о том, что в реализованной схеме всестороннего сжатия среднее нормальное напряжение (гидростатическое давление) также достигает больших величин, поскольку принято считать, что радиальные и тангенциальные напряжения в схеме прессования оцениваются в пределах 60—80 % от удельного давления. Именно этот фактор позволил добиться отсутствия разрушения.

Получение на этом этапе холодной деформацией заготовки из магния толщиной 1 мм из литого слитка без трещинообразования является несомненным достижением, реализованным при использовании описанной схемы деформации. Для проверки пластических свойств продолжили опыты в области холодной деформации.

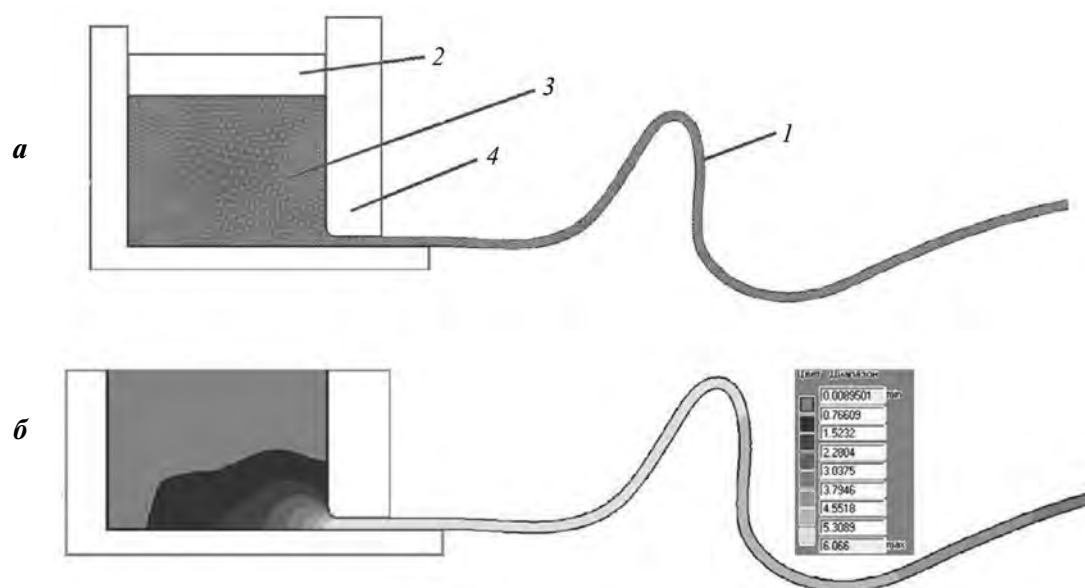
Листовую заготовку разрезали на мерные длины, которые прокатывали при комнатной температуре в фольги толщиной 50 и 10 мкм без промежуточных отжигов. Прокатку проводили на стане Duo с относительными обжатиями 12—20 % при средней скорости 0,1 м/с. Для изготовления фольги толщиной 50 мкм было выполнено 20 проходов с суммарным относительным обжатием 95 %.

Такой способ позволяет за одну операцию при комнатной температуре изготовить из литой маг-

ниевой заготовки тонкую листовую заготовку, при этом величины удельных нагрузок на пуансоне составляют ~12 пределов прочности магния. В результате реализации предложенной схемы выдавливания осуществляется при очень высоком уровне сжимающих напряжений, что предотвращает образование пор и микротрещин, обеспечивая повышение пластических свойств.

На рис. 2, *а* показана микроструктура исходного листа, на рис. 2, *б* — магниевой фольги толщиной 120 мкм (относительное обжатие 88 %), а на рис. 2, *в* — магниевой фольги толщиной 10 мкм (относительное обжатие 99 %). В результате электронно-микроскопических исследований было установлено, что нормали к плоскости базиса некоторых зерен имеют углы с нормалью к плоскости заготовки до 30°. Трещин и других дефектов на поверхности фольги обнаружено не было. При изготовлении фольги толщиной 10 мкм было выполнено 27 проходов с суммарным относительным обжатием 99 %, трещин и других дефектов не наблюдалось.

При холодной прокатке листовой заготовки, имеющей мелкозернистую структуру, формируются новые зерна и ячеистая субструктура. Как следствие, происходит дальнейшее измельчение структурных элементов и отмечается более острая текстура базиса за счет уменьшения интенсивности накопленных сдвиговых деформаций по толщине листовой заготовки. Размер зерен в фольгах не превышал 5 мкм, а в ячеистой субструктуре наблюдались кристаллиты с большеугловыми ориентировками и размерами 0,2—0,7 мкм. Эти результаты указывают на постоянно действующие при прокатке магния обратимые механизмы деформации: динамической рекристаллизации и формирования субструктуры в новых зернах, которые обеспечивают измельчение структуры и способность к дальнейшей деформации.



**Рис. 3.** Решение задачи с сеткой конечных элементов (*а*) и распределение степени деформации сдвига по длине полосы (*б*)  
 1 — полоса; 2 — пуансон; 3 — заготовка; 4 — контейнер

## Результаты компьютерного моделирования

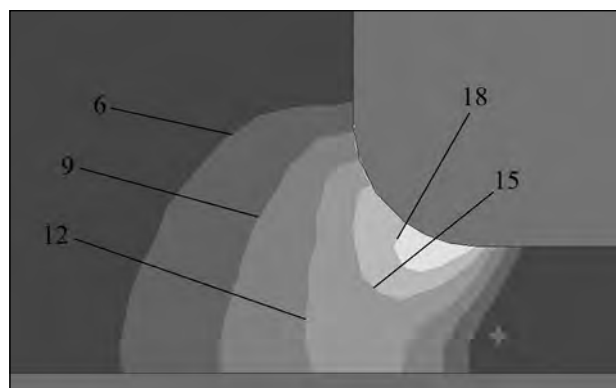
Для решения задачи применяли систему расчета пластического деформирования РАПИД-2D, разработанную в Уральском федеральном университете [23]. В данном случае пришлось ограничиться плоской постановкой задачи при поперечном размере контейнера 42 мм и толщине полосы  $h = 2$  мм. Трение задано законом Зибеля, показатель трения в процессе равен 0,2.

Если воспользоваться обычным подходом, принятым в практике прессования, то следует рассчитать коэффициент вытяжки и по нему определить степень деформации в металле. При плоской постановке задачи коэффициент вытяжки равен  $\lambda = 42/2 = 21$ , степень деформации  $\epsilon = \ln \lambda = 3,04$ , а степень деформации сдвига  $\Lambda = \sqrt{3}\epsilon = 5,27$ .

На рис. 3, *а* приведены результаты решения задачи для такой геометрии инструмента. Полоса 1 выпрессована воздействием пуансона 2 на заготовку 3 из отверстия контейнера 4. Изгиб пресс-изделия специально не задавался, он обусловлен алгоритмом работы интерфейса. На рис. 3, *б* представлено распределение степени деформации сдвига ( $\Lambda$ ) по длине отпрессованной полосы. Видно, что максимальное значение  $\Lambda$  достигается на довольно значительном расстоянии от переднего торца, которое оценено как 50-кратная

толщина полосы. Таким образом, передняя часть полосы может остаться недостаточно проработанной. Также видно, что по толщине полосы не наблюдается неравномерности распределения деформации.

Для оценки формы очага деформации применяли безразмерную относительную величину интенсивности скоростей деформаций сдвига  $H_0 = H/(v/h)$ , где  $H$  — интенсивность скоростей деформаций сдвига,  $v$  — скорость перемещения пуансона;  $h$  — толщина полосы. На рис. 4 показано распределение величины  $H_0$  вблизи контура выхода металла из контейнера. Видно, что сам очаг де-



**Рис. 4.** Форма очага деформации в виде линий равного уровня (значения указаны) относительной (безразмерной) интенсивности скоростей деформаций сдвига  $H_0$

формации локализован вблизи выходного канала и имеется максимум  $H_0$  вблизи точки пересечения двух каналов.

Выяснилось, что на начальной стадии прессования, пока не сформировался стационарный очаг деформации, степень деформации сдвига может достигать значения 3,81, а на установившейся стадии — 4,43. Таким образом, степень деформации оказывается меньше ожидаемой на 20 %. Здесь можно отметить, что степень деформации могла оказаться выше расчетной, так как не учтены дополнительные сдвиги, возникающие при смене направления перемещения металла.

Расчетами выявлено, что в предлагаемом методе прессования общий уровень деформации обеспечивают примерно в равных долях деформации удлинения и сдвига.

## Оценка энергетических затрат

Использование предлагаемой схемы деформации магния не требует применения нагрева. Однако при этом возникают дополнительные энергетические затраты на выполнение операции обработки давлением в условиях пластической деформации с повышением уровня средних нормальных напряжений.

Как было показано выше, в условиях эксперимента давление выдавливания достигало  $p = 1300$  МПа. Для нахождения удельной работы деформации при прессовании ( $A_m$ ) можно использовать следующую формулу [24]:

$$A_m = \frac{1}{\rho V \eta} \int_0^L P dx = \frac{PL}{\rho V \eta} = \frac{P}{\rho F \eta} = \frac{p}{\rho \eta}, \quad (1)$$

где  $P$  и  $p$  — усилие и напряжение деформации;  $L$  — перемещение активного инструмента;  $\eta$  — коэффициент полезного действия процесса;  $\rho$  и  $V$  — соответственно плотность и объем деформируемого материала;  $F$  — площадь, через которую передается давление. В операции интегрирования условно было принято постоянство усилия деформации, что упростило расчеты.

При реализованных в опыте значениях  $\rho = 1,740$  г/см<sup>3</sup> и  $F = 13,85$  см<sup>2</sup> и допущении, что  $\eta = 0,9$ , получим  $A_m = 830$  кДж/кг, или 230 кВт·ч/т.

Если реализовать схему деформации, связанную с нагревом магния, то придется рассчитать удельные затраты на нагрев с учетом разницы температур ( $\Delta t$ ), теплоемкости ( $c$ ) и КПД нагрева ( $\eta$ ) по формуле

$$Q_m = c \Delta t / \eta. \quad (2)$$

Значения КПД нагревательных устройств ниже величин КПД механических установок, из справочных данных для электрических печей примем  $\eta = 0,6$ ,  $\Delta t = 380$  °С, удельная теплоемкость магния  $c = 0,975$  кДж/(кг·град), в результате получим  $Q_m = 618$  кДж/кг, или 172 кВт·ч/т.

К этим затратам необходимо добавить работу горячей деформации. Эта работа пропорциональна сопротивлению деформации металла. В холодном состоянии сопротивление деформации нагартованного магния составляет около 260 МПа [25], и оно может быть снижено за счет нагрева до 70 МПа [26], т.е. в 3,7 раза, соответственно энергозатраты на собственно горячую деформацию составят  $830/3,7 = 224$  кДж/кг, а с учетом нагрева:  $224 + 618 = 842$  кДж/кг.

При применении холодной деформации, несмотря на повышенный уровень применяемых давлений, энергозатраты составили 830 кДж/кг, т.е. они оказались соизмеримы с затратами горячей деформации. Следует отметить, что при использовании пламенного нагрева КПД печей окажется ниже примерно в 2 раза, чем это принято в приведенных выше расчетах. В этом случае применение процесса холодной деформации, по сравнению с горячей, окажется энергетически более выгодным. Дополнительный эффект заключается в том, что нет необходимости в рассеянии энергии нагрева заготовок, что характерно для метода горячей деформации, это не провоцирует общее тепловыделение в производстве и не приводит к климатическим аномалиям в виде глобального потепления.

## Заключение

В результате выполненного комплекса расчетных и экспериментальных работ по деформации чистого магния методом неравноканального углового прессования удалось установить следующее:

- 1) за одну операцию при комнатной температуре удастся изготовить из цилиндрической литой магниевой заготовки тонкую листовую заготовку;
- 2) листовая заготовка обладает уровнем пластичности, достаточным для последующей листовой прокатки;
- 3) полученная в предлагаемом процессе листовая заготовка имеет высокий уровень проработ-

ки пластической деформацией, что создается за счет схемы формоизменения с наличием высокого уровня деформаций удлинения и сдвига;

4) несмотря на высокий уровень давлений, которые приходится применять для создания схемы всестороннего сжатия, с учетом отсутствия необходимости нагрева заготовки, энергетические затраты оказываются не выше, чем в традиционных процессах обработки.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации (контракт № 02.A03.21.0006), в рамках государственного задания по теме «Давление» № АААА-А18-118020190104-3 и по проекту № 18-10-2-24 Программы УрО РАН.*

## Литература/References

1. Powell B.R., Krajewski P.E., Luo A.A. Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive structures. In: *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. P. 114—173.
2. Barnett M.R. Forming of magnesium and its alloys. In: *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. P. 197—231.
3. Рохлин Л.Л. Актуальные проблемы металловедения и применения магниевых сплавов. *Цвет. металлы*. 2006. No. 5. С. 62—66.  
Rokhlin L.L. Actual problems of metal science and application of magnesium alloys. *Tsvetnye metally*. 2006. No. 5. P. 62—66 (In Russ.).
4. Hadadzadeh A., Wells M.A. Analysis of the hot deformation of ZK60 magnesium alloy. *J. Magnesium Alloys*. 2017. Vol. 5 (4). P. 369—387.
5. Mehtedi M.E., Dorazio A., Forcellese A., Pieralisi M., Simoncini M. Effect of the rolling temperature on hot formability of ZAM100 magnesium alloy. *Procedia CIRP*. 2018. Vol. 67. P. 493—497.
6. Guo L., Fujita F. Modeling the microstructure evolution in AZ31 magnesium alloys during hot rolling. *J. Mater. Process. Technol.* 2018. Vol. 255. P. 716—723.
7. Zhi C., Ma L., Huang Q., Huang Z., Lin J. Improvement of magnesium alloy edge cracks by multi-cross rolling. *J. Mater. Process. Technol.* 2018. Vol. 255. P. 333—339.
8. Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В. Изучение упрочнения и разупрочнения магния с учетом анизотропии свойств. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 1999. No. 6. С. 42—46.  
Loginov Yu.N., Burkin S.P., Sapunzhi V.V. The study of hardening and softening of magnesium with anisotropic properties. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 1999. No. 6. P. 42—46 (In Russ.).
9. Kamenetskii B.I., Loginov Y.N., Kruglikov N.A. Possibilities of a new cold upsetting method for increasing magnesium plastification. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58 (2). P. 124—129.
10. Volkov A.Y., Kliukin I.V. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015. Vol. 627. P. 56—60.
11. Agnew S.R., Duygulu O. A mechanistic understanding of the formability of magnesium: Examining the role of temperature on the deformation mechanisms. *Mater. Sci. Forum*. 2003. Vol. 419—422 (I). P. 177—188.
12. Myshlyaev M.M., McQueen H.J., Mwembela A., Konopleva E. Twinning, dynamic recovery and recrystallization in hot worked Mg—Al—Zn alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2002. Vol. 337 (1—2). P. 121—133. DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00007-2.
13. Dobatkin S.V., Rokhlin L.L., Dobatkina T.V., Timofeev V.N., Nikitina N.I., Popov M.V., Estrin Y., Lapovok R. Structure and properties of Mg—Al—Ca alloy after severe plastic deformation. *Mater. Sci. Forum*. 2008. Vol. 584—586. Pt. 1. P. 559—564.
14. Vinogradov A., Orlov D., Danyuk A., Estrin Y. Effect of grain size on the mechanisms of plastic deformation in wrought Mg—Zn—Zr alloy revealed by acoustic emission measurements. *Acta Mater.* 2013. Vol. 61. No. 6. P. 2044—2056.
15. Čížek J., Procházka I., Smola B., Stulíková I., Kužel R., Matěj Z., Cherkaska V., Islamgaliev R.K., Kulyasova O. Microstructure and thermal stability of ultra fine grained mg and Mg—Gd alloys prepared by high-pressure torsion. *Mater. Sci. Forum*. 2005. Vol. 482. P. 183—186.
16. Kulyasova O.B., Raab G.I., Islamgaliev R.K. Effect of the conditions of severe plastic deformation on the microstructure and mechanical properties of AM60 magnesium alloy. *Russ. metallurgy (Metally)*. 2004. Vol. 1. P. 89—93.
17. Скрыбина Н.Е., Антуков В.Н., Романов П.В., Фрушар Д. Применение метода сеток при изучении процессов равноканального углового прессования магниевых сплавов. *Вестн. Перм. нац. иссл. политехн. ун-та. Механика*. 2015. No. 3. С. 133—145.  
Skryabina N.E., Aptukov V.N., Romanov P.V., Frushar D. Application of the grid method in studying the processes of equal-channel angular pressing of magnesium alloys. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2015. No. 3. P. 133—145 (In Russ.).
18. Suwas S., Gottstein G., Kumar R. Evolution of crystallographic texture during equal channel angular extrusion

- (ECAE) and its effects on secondary processing of magnesium. *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. Vol. 471 (1–2). P. 1–14.
19. Lei W., Guo H., Liang W. Microstructure and mechanical properties of pure magnesium after one-pass equal channel angular pressing at room temperature. *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao (J. Harbin Eng. Univ.)*. 2017. Vol. 38 (2). P. 309–312.
20. Логинов Ю.Н., Буркин С.П. Оценка неравномерности деформаций и давлений при угловом прессовании. *Кузнеч.-штамп. пр-во. Обработка материалов давлением*. 2001. No. 3. С. 29–34.  
*Loginov Yu.N., Burkin S.P. Evaluation of the unevenness of deformations and pressures in angular extrusion. Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2001. No. 3. P. 29–34 (In Russ.).
21. Huang Z., Wu X., Fu W. Effect of homogenization treatment on microstructure and properties of AZ31B magnesium alloy casting slab. *Jinshu Rechuli (Heat Treat. Met.)*. 2014. Vol. 39 (10). P. 116–117.
22. Martynenko N.S., Lukyanova E.A., Serebryany V.N., Gorshenkov M.V., Shchetinin I.V., Raab, G.I., Dobatkin S.V., Estrin Y. Increasing strength and ductility of magnesium alloy WE43 by equal-channel angular pressing. *Mater. Sci. Eng. A*. 2018. Vol. 712. P. 625–629.
23. Полищук Е.Г., Жиров Д.С., Вайсбурд Р.А. Система расчета пластического деформирования РАПИД. *Кузнеч.-штамп. пр-во*. 1997. No. 8. С. 16–19.  
*Polishchuk E.G., Zhirov D.S., Vaisburd R.A. The system of plastic deformation calculation RAPID. Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*. 1997. No. 8. P. 16–19 (In Russ.).
24. Логинов Ю.Н., Буркин С.П. Энергосбережение в процессах прессования. *Цвет. металлы*. 2002. No. 10. С. 81–87.  
*Loginov Yu.N., Burkin S.P. Energy saving in pressing processes. Tsvetnye metally*. 2002. No. 10. P. 81–87 (In Russ.).
25. Chen X.M., Li L.T., Chen W.Z., Zhang W.C., Wang E.D. Fine-grained structure and recrystallization at ambient temperature for pure magnesium subjected to large cold plastic deformation. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017. Vol. 708. P. 351–359.
26. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983.  
*Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. Resistance of plastic deformation of metals and alloys. Moscow: Metallurgiya*, 1983 (In Russ.).