Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Ногаев К.А., Буканов Ж.У. Напряженно-деформационное состояние при осадке широких полос со сдвигом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 2. С. 22–28. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.03

Ashkeyev Z.A., Andreyachshenko V.A., Nogaev K.A., Bukanov Z.U. Stress-strain state during draft of wide bands with shear. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 2, pp. 22-28. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.03

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 2, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.2.03
УДК 621.771-014

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ОСАДКЕ ШИРОКИХ ПОЛОС СО СДВИГОМ

Ж.А. Ашкеев[1], В.А. Андреященко[2], К.А. Ногаев[1], Ж.У. Буканов[2]

[1]Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан
[2]Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

О СТАТЬЕ

Получена: 20 июня 2022 г.
Одобрена: 06 марта 2023 г.
Принята к публикации:
30 апреля 2023 г.

Ключевые слова:

деформация, напряженное состояние, линии скольжения, усилие деформации, интенсивная пластическая деформация.

АННОТАЦИЯ

Процессы ковки являются традиционными методами металлообработки, их применение весьма обширно и позволяет изготовлять металлоизделия для различных областей промышленности в широком диапазоне температур. Перераспределение главных действующих сил при формоизменении является необходимым условием для перевода традиционных методов ковки в высокотехнологичные способы производства металлов. Основной продукцией кузнечно-прессового производства являются поковки типа плит и пластин. В настоящей работе исследовано влияние сдвигающих сил на напряженно-деформированное состояние при перераспределении сил трения на контактной поверхности и/или изменении характера течения металла при осадке широких полос. Анализ напряженного состояния осуществлялся методом линий скольжения с сопоставлением с существующим способом осадки без сдвига. Составлены поле линий скольжения и годограф скоростей для осадки полосы со сдвигом. Аналитическим методом оценены напряжения и интенсивности деформации сдвига. Выявлено, что осадка полосы между плоскопараллельными плитами сопровождается крайне неравномерной деформацией по сечению заготовки. Выполнено сравнение напряженного состояния при традиционном деформировании и с наложением сдвиговой деформации. Применение сдвигов позволило реализовать преимущественно сжимающие напряжения, которые позволяют устранять внутренних дефекты заготовки литейного происхождения. Введение сдвиговых деформаций способствует интенсификации процесса пластической деформации по всему сечению полосы, величины напряжения при осадке с дополнительным сдвигом увеличиваются в среднем в 4–6 раз при сравнении с обычной осадкой. Увеличение напряжения происходит за счет развития интенсивности деформации сдвига, достигающее величины 0,4 за одно обжатие.

© ПНИПУ

© **Ашкеев Жасулан Аманжолович –** к.т.н., доц., e-mail: jashkeev@mail.ru
Андреященко Виолетта Александровна – к.т.н., доц., e-mail: Vi-ta.z@mail.ru
Ногаев Кайрош Абилович – к.т.н., зав. каф., e-mail: nk-1912@mail.ru
Буканов Жанат Умиртаевич – магистр, ст. преп., e-mail: heissen69@mail.ru

Zhassulan A. Ashkeyev – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: jashkeev@mail.ru
Violetta A. Andreyachshenko – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: Vi-ta.z@mail.ru
Kayrosh A. Nogaev – CSc in Technical Sciences, Head of Department, e-mail: nk-1912@mail.ru
Zhanat U. Bukanov – Master, Senior Lecturer, e-mail: heissen69@mail.ru

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

STRESS-STRAIN STATE DURING DRAFT OF WIDE BANDS WITH SHEAR

Z.A. Ashkeyev[1], V.A. Andreyachshenko[2], K.A. Nogaev[1], Z.U. Bukanov[2]

[1]Karaganda industrial university, Temirtau, Kazakhstan
[2]Abylkas Saginov Karaganda technical university, Karaganda, Kazakhstan

ARTICLE INFO

Received: 20 June 2022
Approved: 06 March 2023
Accepted for publication:
30 April 2023

Keywords:

deformation, stress state, slip lines, strain force, severe plastic deformation.

ABSTRACT

Forging processes are traditional methods of metalworking, their application is very extensive and allows the manufacture of metal products for various industries in a wide temperature range. The redistribution of the main acting forces during forming is a necessary condition for the transfer of traditional forging methods to high-tech methods of metal production. The main products of press-forging production are forgings such as pallets and plates. In the present work, the effect of shear forces on the stress-strain state is studied when the friction forces are redistributed on the contact surface and/or the nature of the metal flow changes during upsetting of wide strips. The analysis of the stress state was carried out by the method of slip lines compared with the existing method of settlement without shear. The field of slip lines and the hodograph of velocities for the draft of the strip with a shift are compiled. The stresses and intensity of the shear deformation were estimated by the analytical method. It was revealed that the upsetting of the strip between plane-parallel plates is accompanied by extremely uneven deformation over the section of the workpiece. The stress state is compared with traditional deformation and with superimposed shear deformation. The use of shears made it possible to realize predominantly compressive stresses, which make it possible to eliminate internal defects of the workpiece of foundry origin. The introduction of shear deformations contributes to the intensification of the plastic deformation process over the entire cross section of the strip, the stress values during draft with additional shear increase on average 4-6 times compared to normal draft. The increase in stress occurs due to the development of the intensity of shear deformation, reaching a value of 0.4 per compression.

© PNRPU

Введение

Эффективность применения сдвиговых деформаций в обработке металлов давлением подтверждена достаточным количеством авторитетных научных трудов. Интеграция процессов с элементами сдвиговых деформаций в реализацию традиционных схем изготовления металлоизделий позволила существенно улучшить комплекс конечных эксплуатационных характеристик обрабатываемых металлов, включая такие ключевые аспекты, как прочность, ударная вязкость, коррозионная стойкость и т.д. [1–3].

Реализовать преимущественно сдвиговые деформации в классических способах обработки давлением достаточно сложно, поэтому модернизация металлообрабатывающих устройств и перераспределение главных действующих сил при формоизменении является необходимым условием для высокотехнологичного способа производства металлов в современных условиях. Методы, реализующие сдвиговые деформации, как правило, входят в группу методов, объединяемых общим термином «интенсивная пластическая деформация» (ИПД). Стоит отметить, что методы ИПД представляют собой две большие группы, ранжирующиеся по принципу изменения поперечного сечения на группу методов, при применении которых пластическая деформация заготовки протекает без изменения ее поперечного сечения. Наиболее хорошо изученным из них является равноканальное угловое прессование [4–7] и его вариации [8–12]. Ко второй группе относятся процессы, при которых деформирование заготовки происходит с изменением ее поперечного сечения [13–17].

В процессах ковки себестоимость данного вида продукции, а также технологичность ее последующей переработки непосредственно связаны с формирующимся напряженно-деформированным состоянием и характером течения металла при ковке заготовок. Определяющими при этом являются следующие факторы: фактор формы, температурный и кинематический факторы [18].

Наиболее часто встречающиеся приемы модернизации устройств и/или технологии реализации ковки направлены на пересмотр геометрии инструмента, параметров скорости рабочих бойков, температуры бойков и заготовки, скорости деформации и т.д. [19–24]. Маршрут деформирования, кроме прочего, существенно влияет на неравномерность напряженно-деформированного состояния, которая накапливается с каждым деформационным циклом [25].

Цель работы – установление влияния сдвиговых деформаций при осадке на напряженно-деформационное состояние широких полос.

1. Материалы и методы

Известно, что осадка полосы между плоскопараллельными плитами сопровождается крайне неравномерной деформацией по сечению заготовки. При этом

неравномерность деформации при осадке выражается бочкообразованием боковой поверхности полосы за счет противоположно направленных сил контактного трения относительно оси симметрии *y*. Поэтому ставится задача о возможности перераспределения сил трения на контактной поверхности и/или изменения характера течения металла при осадке.

Одним из путей изменения характера течения металла при осадке является создание дополнительных сдвигающих сил. В этом случае силы контактного трения $\tau_к$ меняют свое направление, становятся частично активными (если не учитывать течение металла при осаживании), так как совпадают с направлением движения сдвигающих бойков в поперечном направлении полосы.

Рассмотрим влияние сдвигающих сил на напряженно-деформированное состояние (НДС) при осадке широких полос с отношением ширины (*в*) и высоты (*h*): *в* / *h* =3 (рис.1), поскольку основной продукцией кузнечно-прессового производства являются поковки типа плит и пластин. Следует отметить, что качество поковок при ковке, штамповке и прокатке во многом определяется напряженно-деформированным состоянием, в частности при осадке полосы со сдвигом [26-28].

2. Результаты и их обсуждение

Для исследования НДС широких полос при осадке со сдвигом на угол $\gamma=15^0$ строим поле линий скольжения (л. с.) и годограф скоростей (рис. 1). Метод был разработан в 20-е гг. XX в. Г. Генке и Л. Прандтлем для определения напряженного состояния по объему деформируемого тела при плоской и осесимметричной деформации [26; 29; 30]. Зная напряжения в любой точке тела, можно определить напряжение на контактной поверхности с инструментом и тем самым найти полное усилие деформации. При определении напряженного состояния с использованием метода линий скольжения используют следующие свойства:

1. Линии скольжения образуют два взаимно-перпендикулярных семейства кривых α и β.

2. Линии скольжения должны быть непрерывными.

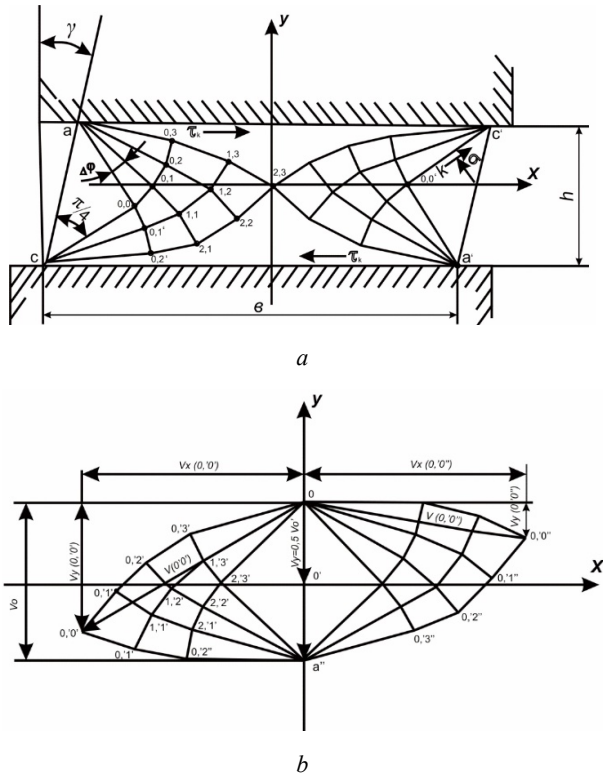
3. Линии скольжения должны быть ортогональными.

4. Линии скольжения должны пересекать направление главных нормальных напряжений под углом π/4.

5. Изменение среднего нормального напряжения $\sigma_{ср}$ при движении вдоль линии скольжения равно произведению угла её поворота на 2*k*.

Стоит отметить, что метод применим к любым размерам поковок, а распределение напряжений (при прочих равных условиях) будет зависеть преимущественно от геометрии поковки и рабочего инструмента.

На основании вышеизложенных принципов и руководствуясь данными о движении рабочего инструмента при осадке со сдвигом, построено поле линий скольжения. Угол сдвига полосы по возможности необходимо принимать небольшим, так как с увеличением угла сдвига сильно искажается сечение полосы, что приводит к дополнительным операциям правки.



a

b

Рис. 1. Поле линий скольжения (*a*) и годограф скоростей (*b*) при осадке широких полос с дополнительными сдвигающими силами

Fig. 1. The field of slip lines (*a*) and the hodograph of velocities (*b*) during draft of wide strips with additional shear forces

Построение поля линий скольжения (л.с.), как и при обычной осадке, начинаем со свободной поверхности *a*,*c* (*a*′, *c*′), куда л.с. выходят под углом π/4, пересечение которых образуют точки 0.0 и 0.0′. Далее, проведя из точек *a* и *c* пучок прямых линии длиной *a* – 0.0 с шагом π/12 и дуги из указанных точек, получим точки пересечения 0.1, 0.2, 0.3 и 0.1′, 0.2′.

Используя свойство ортогональности метода л.с., построение сетки л.с. производим до узловой точки 2.3, которая является центром симметрии полосы. При этом поле л.с., расположенное с правой стороны сечения, будет располагаться кососимметрично левой стороне относительно оси *y*, в отличие от обычной осадки без сдвига.

Теперь приступим к расчету напряжений в полученных узловых точках поля л.с. Для этого определим среднее напряжение в узловых точках 0.0 (0.0′ справа) из условия равновесия сил, приложенных к пластической зоне справа, т.е. к треугольнику Δ *a*′, *c*′, 00′:

$$\sigma_{0.0}(y_{c'} - y_{0.0'}) + k x_{c'} + \sigma_{0.0}(y_{0.0'} - y_{a'}) + k x_{a'} = 0.$$

После преобразования и подстановки соответствующих координат *x* и *y*, получим:

$$\sigma_{0.0}= k\frac{(x_{c'}+x_{a'})}{(y_{c'}-y_{a'})} = -6k.$$

Построение годографа скоростей осуществляли следующим образом. От полюса О по направлению осадки откладываем отрезок, длину которого в масштабе 1:1 принимаем равной 25 мм, т.е. соответствующей скорости υ_y = 0,5, υ_0 = 25 мм/с (1 мм = 0,025 м/с), где υ_0 – скорость передвижения верхнего бойка. Далее с конца отрезка (с конца вектора υ_y) проводим линию, параллельную оси *x*, а с полюса 0 проводим линию под углом 45° к оси *y* до пересечения с линией, проведенной параллельно оси *x*. Пересечение проведенных линий даст точку (2′3′), а длина полученного отрезка даст скорость узловой точки 2.3. Аналогичным образом, используя свойство ортогональности, продолжаем построение годографа скоростей до узловой точки 0.0. С правой стороны производим аналогичное построение до точки 0.0′, которое будет располагаться относительно оси *y* косо-симметрично (рис. 1, *b*).

Из построенного годографа скоростей можно заметить, что значения скоростей узловых точек относительно осей *x* и *y* будут неодинаковы, по сравнению с обычной осадкой без сдвига (рис. 1, *b* и 2, *b*). Например, в крайних узловых точках 0.0 и 0.0′ значения скоростей из годографа будут следующие: $\upsilon_{x(0'.0')} = \upsilon_{x(0'.0'')}$; $\upsilon_{y(0'.0')} > \upsilon_{y(0'.0'')}$; $\upsilon_{(0'.0')} > \upsilon_{(0'.0'')}$ (см. рис. 1, *b*). Одинаковые значения наблюдаются в узловых точках 2.3 и 1.2, а в остальных точках различны. Следует отметить, что из-за разностей скоростей точек возникают сдвиговые деформации по сечению полосы, с помощью которых можно определить интенсивность скоростей деформации сдвига. Приращения интенсивности скоростей деформации сдвига ΔГ определим из построенного годографа скоростей (см. рис. 1, *b*). Значения ΔГ определяем отношением разностей скоростей в соответствующих узловых точках к половине расстояния между ними. Например, в узловых точках 0.0 и 0.0′:

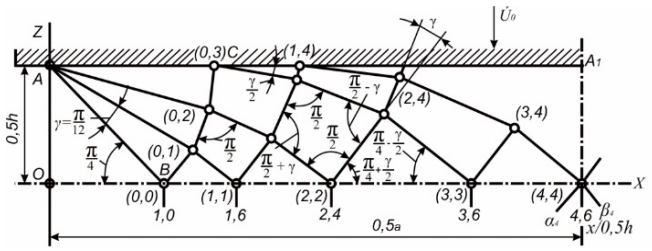
$$\Delta\Gamma_{(0.0-0.0')} = \frac{\upsilon_{y(0'.0')} - \upsilon_{y(0'.0'')}}{\upsilon_{x(0'.0')}} = 0,358.$$

Аналогичные вычисления в остальных узловых точках показали, что значения ΔГ находятся в пределах 0,01–0,85, а в центральной узловой точке 2.3, ΔГ= 0, так как приращение скоростей равно нулю. Известно, что интенсивность деформации сдвига существенно влияет на качество металла. Чем выше это значение, тем больше проработка структуры металла. Расчеты показывают, что максимальные значения ΔГ наблюдаются между узловыми точками 0.0 и 2.3, т.е. непосредственно в самом очаге пластической деформации, что вполне закономерно.

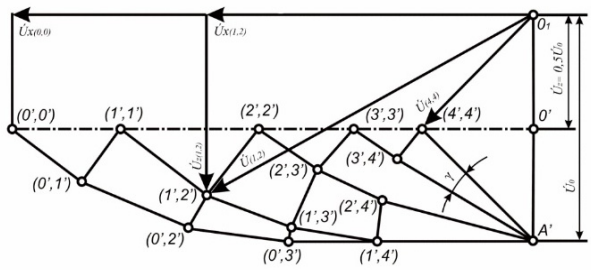
Таким образом, качество поковок определяется накопленным значением ΔГ в очаге деформации. При многократном повторении циклов деформирования накопленная деформация сдвига будет равна Г = $\Delta\Gamma_{ср}N$, $\Delta\Gamma_{ср}$ – среднее значение приращения интенсивности деформации сдвига, *N* – количество циклов деформирования (количество проходов).

Рассмотрим теперь процесс обычной осадки полосы без сдвига между плоскими плитами (рис. 2).

Пластическая деформация при этом происходит за счет выдавливания металла между плоскопараллельными плитами в сторону свободной поверхности [26]. На контактных поверхностях возникают максимальные силы трения, величину которых можно определить: $\tau=k_*\sin2\varphi$, где $0<\varphi\le\pi/4$, φ – угол выхода на свободную поверхность. При $\varphi=\pi/4$, $\tau=k$, т.е. силы трения на контактной поверхности достигают максимальное значение. На свободной поверхности полосы и примыкающей к ней области действуют следующие напряжения: $\sigma_y = -\sigma_s$, $\sigma_x = 0$, $\varphi=\frac{\pi}{4}$ и $\tau_{xy} = 0$. В узловой точке 0.0 из условия равновесия сил, получим: $\sigma_{0.0}(y_a - y_{0.0})+kx_a = 0$, отсюда, $\sigma_{ср0.0} = -k\frac{y}{x}$, при $x = y$, $\sigma_{ср0.0} = -k$.



a



b

Рис. 2. Поле линий скольжения (*a*) и годограф скоростей (*b*) для осадки полосы между плоскопараллельными плитами [26]

Fig. 2. The field of slip lines (*a*) and the hodograph of velocities (*b*) for draft of a strip between plane-parallel plates [26]

Угол поворота л.с. построенного поля (см. рис. 1), как и при обычной осадке, равен $\Delta\varphi = 15^0$ или π/12 радиан при переходе от одной узловой точки к другой. Величины напряжений в узловых точках л.с. можно вычислить по следующей формуле, приведенной в работах [26; 29; 30]:

$\sigma_{cpij}=\sigma_{cpi,1-j} - 2k\ \Delta\varphi$, например, в узловой точке 0.1, т.е. при $i = 0$ и $j = 1$, где *i* и *j* – индексы узловых точек кривых л.с.

$$\sigma_{cp0.1}=\sigma_{cp0.1-1}-2k\Delta\varphi=\sigma_{cp0.0}-2k\frac{\pi}{12}=$$

$$-2k(0{,}5+\frac{\pi}{12})=2k0{,}7617, \quad (1)$$

при $i = 0$ и $j = 2$, $\sigma_{cp0.2}=\sigma_{cp0.2-1}-2k.\Delta\varphi=\sigma_{cp0.1}-2k\frac{\pi}{12}=$

$=-2k[0{,}5+\frac{\pi}{6}]$, и т.д. до центральной узловой точки 2.3.

Напряжения в узловых точках л.с. при осадке со сдвигом можно также определить по вышеприведенной формуле (1). По аналогии вычисления начинаем со свободной поверхности, но с той лишь разницей, что среднее напряжение в узловой точке 0.0 (0.0′) будет равно $\sigma_{cp0.0} = -4{,}6k$. Отсюда во всех других узловых точках величины напряжения будут также больше на эту величину. Например, в узловой точке 0.1 сетки л.с. при осадке со сдвигом среднее напряжение будет равно: $\sigma_{cp0.1} = \sigma_{cp0.0}-2k\Delta\varphi = -6k-2k\Delta\varphi = -2k(3+\frac{\pi}{12}) = -2k2{,}5617$, т.е. превышает соответствующее значение скорости в точке 0.1 при обычной осадке ≈ в 4 раза.

Сопоставление величин средних напряжений в узловых точках кривых л.с. показывает рост величины напряжения по сечению полосы при осадке со сдвигом в среднем в 4–6 раз. Вполне справедливо, что увеличение напряжения происходит за счет развития интенсивности деформации сдвига, которое достигает 0,4. Представленный расчет применим для всех типов материалов, а конкретизация происходит путем подстановки значения величины k, связанной с пределом текучести материала.

При обычной осадке полосы без сдвига приращения интенсивности деформации сдвига не наблюдается, так как скорости узловых точек относительно осей x и y одинаковы (рис. 2, *b*). Отсюда интенсивность деформации сдвига при обычной осадке без сдвига минимальна, поэтому и соответствующее качество металла будет обеспечиваться при многократных проходах и переходах.

Следует отметить, что большие напряжения в зоне пластической деформации будут способствовать интенсификации процесса пластической деформации по всему сечению полосы. Максимальные сжимающие напряжения, в свою очередь, будут способствовать устранению всех внутренних дефектов заготовки закрытием и завариванием пор, трещин, пустот и других дефектов литейного происхождения. Требуемое качество поковок прямоугольного сечения может быть обеспечено за меньшее количество проходов и переходов. Особенно данный способ осадки со сдвигом эффективен при обработке слитков для получения поковок типа плит, пластин квадратного и прямоугольного сечения.

Таким образом, исследование НДС широких полос при осадке со сдвигом показало возможность получения качественных поковок из слитков и заготовок за счет интенсификации сжимающих напряжений по всему сечению полосы. Кроме того, несимметричность распределения НДС по сечению полосы и активизация сил контактного трения позволяет значительно снизить бочкообразность боковой поверхности и тем самым исключают дополнительную операцию правки поковки путем многократной кантовки.

Заключение

Применение процесса осадки со сдвигом при ковке широких полос обеспечивает получение более качественных поковок из слитков и заготовок за счет интенсификации сжимающих напряжений по всему сечению полосы. Получение качественных поковок обеспечивается за счет развития интенсивности деформации сдвига по всему сечению полосы при меньшем количестве проходов и переходов, что значительно повышает производительность процесса ковки. Осадка со сдвигом способствует росту величины напряжения по сечению полосы в среднем в 4–6 раза.

Таким образом, использование способа осадки широких полос со сдвигом даст возможность сократить энергетические расходы, так как требуемое качество металла достигается за меньшее количество проходов и переходов за счет развития интенсивности деформации сдвига по сечению полосы. При этом интенсивность деформации сдвига развивается за счет разностей скоростей узловых точек при дополнительном воздействии сдвигающих сил. Кроме того, при дополнительном сдвиге силы контактного трения становиться активными.

Библиографический список

1. Characterising Correlations between Electric Conductivity and Structural Features in Rotary Swaged Al/Cu Laminated Conductors / L. Kunčická [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 1003. DOI: 10.3390/ma15031003

2. Corrosion Behavior of Ultrafine-Grained CoCrFeMnNi High-Entropy Alloys Fabricated by High-Pressure Torsion / H. Shimizu Materials. – 2022 – № 15. – P. 1007. DOI: 10.3390/ma15031007

3. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: Microstructure and mechanical properties / V. Andreyachshenko [et al.] // Materiali in Tehnologije. – 2019. – Vol. 53(6). – P. 805–810.

4. Mechanical behaviour of Aluminium Alloy AA6063 processed through ECAP with optimum die design parameters / K.M. Agarwal [et al.] // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2021. – P. 1–15. DOI: 10.1080/2374068X.2021.1878705

5. Effect of ECAP processing on distribution of second phase particles, hardness and electrical conductivity of Cu− 0.81 Cr− 0.07 Zr alloy / F.C. Dalan [et al.] // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2022. – Vol. 32 (1). – P. 217–232. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65789-8

6. Enhancement of strength-ductility synergy in ultrafine-grained Cu-Zn alloy prepared by ECAP and subsequent annealing /

J. Chen [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2022. – No. 17. – P. 433–440. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.01.026

7. Andreyachshenko V.A., Naizabekov A.B. Microstructural and mechanical characteristics of AlSiMnFe alloy processed by equal channel angular pressing // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55, no. 3. – P. 353–356.

8. Derakhshan J.F., Parsa M.H., Jafarian H.R. Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 747. – P. 120–129. DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.058

9. Study of structure of naturally aged aluminium after twist channel angular pressing / L. Kunčická [et al.] // Materials Characterization. – 2019. – Vol. 152. – P. 94–100. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.03.045

10. Kocich R., Kunčická L., Macháčková A. Twist Channel Multi-Angular Pressing (TCMAP) as a method for increasing the efficiency of SPD // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2014. – No. 63. – P. 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/63/1/012006

11. Andreyachshenko V. Evolution of Al – Si – Mn – Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure // Materials Letters. – 2019. – Vol. 254. – P. 433–435. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.07.127

12. Naizabekov A., Andreyachshenko V., Kliber J. Forming of microstructure of the Al – Si – Fe – Mn system alloy by equal channel angular pressing with backpressure // Conf. Proc. 21st International Conference on Metallurgy and Materials (Metal-2012), edited by Tanger (Brno Czech Republic, 2012). – 2012. – P. 391–395.

13. Andreyachshenko V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55, no 4. – P. 829–831.

14. Мухтаров Ш. Х., Валитов В. А., Дудова Н. Р. Влияние нанокристаллической структуры на сверхпластическое поведение сплава Inconel 718 // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Спец. вып. – Ч. 2. – С. 38–41.

15. Жбанков Я.Г., Швец А.А., Гунько М.И. Дифференцированная ковка протяжкой плоскими бойками // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА. – 2013. – № 2 (35). – С. 60–65.

16. Марков О.Е. Эффективная схема ковки крупных слитков с использованием кузнечной протяжки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2012. – № 8. – С. 44–48.

17. Пат. РФ 2252834. Способ ковки заготовок плоскими бойками / В.В. Овечкин, Р. Копп, О. Зигльмайер, В.А. Тюрин.

18. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Периг А.В. Факторы, влияющие на параметры ковки крупных поковок // Вестник ПНИПУ «Машиностроение, материаловедение». – 2013. – Т. 15, № 1. – С. 27–44.

19. Lee J.-J., Jung U-J., Park G.-J. Shape optimization of the workpiece in the forging process using equivalent static loads // Finite Elements in Analysis and Design. – 2013. – No. 69. – P. 1–18.

20. Optimum back-pressure forging using servo die cushion / K. Kawamoto, T. Yoneyama, M. Okada, S. Kitayama, J. Chikahisa // 11th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP-2014), Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan Procedia Engineering. – 2014. – No. 81. – P. 346–351.

21A study of direct forging process for powder superalloys / Q. Bai [et al.] // Materials Science & Engineering A. – 2015. – No. 621. – P. 68–75.

22. Enhanced microstructure homogeneity and mechanical properties of AZ31–Si composite by cyclic closed-die forging / W. Guo [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – No. 552. – P. 409–417.

23. Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy processed by cyclic closed-die forging / W. Guo [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – No. 558. – P. 164–171.

24. Microstructure, texture and mechanical properties of coarse-grained Mg–Gd–Y–Nd–Zr alloy processed by multidirectional forging / X. Xia [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – No. 623. – P. 62–68.

25. Паршиков Р.А., Золотов А.М., Рудской А.И. Анализ неоднородности напряженно-деформированного состояния металла в процессах интенсивной пластической деформации // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2016. – № 1 (44). – С. 5–13.

26. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

27. Ashkeyev Z.A., Andreyachshenko V.A., Bukanov Z.U. Research of the asymmetric rolling of workpieces // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2020. – No. 4. – P. 27–35.

28. Determination of the stress state and the force of deformation of ball-shaped billets in a closed matrix / Z.A. Ashkeyev [et al.] // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2021. – No. 4.– P. 5–12.

29. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

30. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

References

1. Kunčická L.; Kocich R.; Kačor P.; Jambor M.; Marek M. Characterising Correlations between Electric Conductivity and Structural Features in Rotary Swaged Al/Cu Laminated Conductors, *Materials*, 2022, 15, pp. 1003. https://doi.org/10.3390/ma15031003

2. Shimizu H., Yuasa M., Miyamoto H., Edalati K. Corrosion Behavior of Ultrafine-Grained CoCrFeMnNi High-Entropy Alloys Fabricated by High-Pressure Torsion, *Materials*, 15 (3), 2022, pp. 1007. https://doi.org/10.3390/ma15031007

3. Andreyachshenko V., Isheva Y., Mazhit A., Imangazinova D. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: Microstructure and mechanical properties, *Materiali in Tehnologije*, 2019, 53 (6), pp. 805–810.

4. Agarwal K. M., Tyagi R. K., Choubey V., Saxena K. K. Mechanical behaviour of Aluminium Alloy AA6063 processed through ECAP with optimum die design parameters, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2021, pp. 1-15. DOI: 10.1080/2374068X.2021.1878705

5. Dalan F. C., de Lima Andreani G. F., Travessa D. N., Faizov I. A., Faizova S., Cardoso K. R. Effect of ECAP processing on distribution of second phase particles, hardness and electrical conductivity of Cu− 0.81 Cr− 0.07 Zr alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32 (1), pp. 217-232. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65789-8

6. Chen J., Su Y., Zhang Q., Sun J., Yang D., Jiang J., Dan Song, Ma A. Enhancement of strength-ductility synergy in ultrafine-grained Cu-Zn alloy prepared by ECAP and subsequent annealing, *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17, pp. 433-440. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.026

7. Andreyachshenko V.A., Naizabekov A.B. Microstructural and mechanical characteristics of AlSiMnFe alloy processed by

equal channel angular pressing, *Metalurgija*, 2016, 55 (3), pp. 353–356.

8. Derakhshan J.F., Parsa M.H., Jafarian H.R. Microstructure and mechanical properties variations of pure aluminum subjected to one pass of ECAP-Conform process, *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 747, pp. 120–129. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.058

9. Kunčická L., Kocich R., Ryukhtin V., Cullen J.C.T., Lavery N.P. Study of structure of naturally aged aluminium after twist channel angular pressing, *Materials Characterization*, 2019, 152, pp. 94–100. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.03.045

10. Kocich R., Kunčická L., Macháčková A. Twist Channel Multi-Angular Pressing (TCMAP) as a method for increasing the efficiency of SPD, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, 63, P. 012006. doi:10.1088/1757-899X/63/1/012006

11. Andreyachshenko V. Evolution of Al – Si – Mn – Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure, *Materials Letters*, 2019, 254, pp. 433–435. DOI 10.1016/j.matlet.2019.07.127

12. Naizabekov A., Andreyachshenko V., Kliber J. Forming of microstructure of the Al – Si – Fe – Mn system alloy by equal channel angular pressing with backpressure, In Conf. Proc. 21st International Conference on Metallurgy and Materials (Metal-2012), edited by Tanger (Brno Czech Republic, 2012), 2012, pp. 391–395.

13. Andreyachshenko V.A. Finite element simulation (FES) of the fullering in device with movable elements, Metalurgija, 2016, 55 (4), pp. 829–831.

14. Muhtarov SH. H., Valitov V. A., Dudova N. R. Vliyanie nanokristallicheskoj struktury na sverhplasticheskoe povedenie splava Inconel 718 (Influence of nanocrystalline structure on superplastic behavior of Inconel 718 alloy), *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2004, 7 (2), pp. 38-41.

15. Zhbankov YA. G., SHvec A. A., Gun'ko M. I. Differencirovannaya kovka protyazhkoj ploskimi bojkami (Differentiated forging by broach with flat dies), *Obrabotka materialov davleniem: sb. nauchn. trudov*, 2013, 2 (35), pp. 60-65.

16. Markov O.E. Effektivnaya skhema kovki krupnyh slitkov s ispol'zovaniem kuznechnoj protyazhki (An effective scheme for forging large ingots using a forging broach), *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*, 2012, 8, pp. 44-48.

17. Ovechkin V.V., Kopp R., Zigl'majer O., Tyurin V.A. Sposob kovki zagotovok ploskimi bojkami (Method for forging blanks with flat dies), Patent (RU 2252834).

18. Aliev I.S., Zhbankov YA.G., Perig A.V. Faktory, vliyayushchie na parametry kovki krupnyh pokovok (Factors influencing the parameters of forging large forgings), *Vestnik PNIPU «Mashinostroenie, materialovedenie», 2013,* 15 (1), pp. 27-44.

19. Lee J.-J., Jung U-J., Park G.-J. Shape optimization of the workpiece in the forging process using equivalent static loads, *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 69, pp. 1–18.

20. Kawamoto K., Yoneyama T., Okada M., Kitayama S., Chikahisa J. Optimum back-pressure forging using servo die cushion, *In Proc. 11th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2014)*, 2014, 81, P. 346 – 351.

21. Bai Q., Lin J., Jiang J., Dean T.A., Zou J., Tian G. A study of direct forging process for powder superalloys, *Materials Science & Engineering A*, 2015, 621, pp. 68–75.

22. Guo W., Wang Q., Ye B., Zhou H. Enhanced microstructure homogeneity and mechanical properties of AZ31–Si composite by cyclic closed-die forging, *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 552, pp. 409–417.

23. Guo W., Wang Q., Ye B., Zhou H. Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy processed by cyclic closed-die forging, *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 558, pp. 164–171.

24. Xia X., Chen Q., Zhao Z., Ma M., Li X., Zhang K. Microstructure, texture and mechanical properties of coarse-grained Mg–Gd–Y–Nd–Zr alloy processed by multidirectional forging, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 623, pp. 62–68.

25. Parshikov R. A., Zolotov A. M., Rudskoj A. I. Analiz neodnorodnosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metalla v processah intensivnoj plasticheskoj deformacii (Analysis of the heterogeneity of the stress-strain state of the metal in the processes of severe plastic deformation), *Obrabotka sploshnyh i sloistyh materialov*, 2016, 1 (44), pp. 5-13.

26. Storozhev M.V., Popov E.A. Teorija obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 423 p.

27. Ashkeyev Z.A., Andreyachshenko V.A., Bukanov Z.U. Research of the asymmetric rolling of workpieces, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, 4, pp. 27–35.

28. Ashkeyev Z.A., Andreyachshenko V.A., Abishkenov M.Z., Bukanov Z.U. Determination of the stress state and the force of deformation of ball-shaped billets in a closed matrix, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, 4, pp. 5–12.

29. Kolmogorov V.L. Mehanika obrabotki metallov davleniem [Mechanics of metal forming]. Moscow, Metallurgija, 1986, 688 p.

30. Tomlenov A.D. Teorija plasticheskogo deformirovanija metallov [The theory of plastic deformation of metals]. Moscow, Metallurgija, 1972, 408 p.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Financing. The study was not sponsored
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.