

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ
ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ АК6, АК8, АМГ, АМЦ****Скрябин С. А., Гунько И. В., Чайка Д. С.**

Описана методика проведения исследования по определению показателя напряженно-го состояния и рассчитан этот показатель для сплавов АК6, АК8, АМЦ, АМГ. Описан метод, использующий результаты испытания сопротивления деформации при растяжении образцов на пластометре, и поправочный коэффициент $K_{\sigma} = n_{\sigma} \cdot n_B$, учитывающий напряженное состояние деформируемого металла и влияние ширины заготовки на удельное давление (при определении базисного давления $P_{cp.б.} = \sigma_{0,2} \cdot K_{\sigma}$). В статье приведена полученная авторами формула, по которой, учитывая имеющиеся данные по определению $\sigma_{0,2}$, σ_{ϵ} и δ для сплавов АК6, АК8, АМГ и АМЦ и K_{σ} для сплава АК6, находится поправочный коэффициент K_{σ} для сплава АК8, АМГ и АМЦ при вальцовке заготовок, имеющих температуру 420 °С и 470 °С.

Описано методику проведения дослідження з визначення показника напруженого стану та розраховано цей показник для сплавів АК6, АК8, АМЦ, АМГ. Описано метод, що використовує результати випробування опору деформації при розтягуванні зразків на пластометрі, та поправочний коефіцієнт $K_{\sigma} = n_{\sigma} \cdot n_B$, що враховує напружений стан деформованого металу й вплив ширини заготовки на питомий тиск (при визначенні базисного тиску $K_{\sigma} = P_{cp.б.} / \sigma_{0,2}$). У статті наведена отримана авторами формула, по якій, враховуючи наявні дані по визначенню $\sigma_{0,2}$, σ_{ϵ} та δ для сплавів АК6, АК8, АМГ та АМЦ і K_{σ} для сплаву АК6, знаходиться поправочний коефіцієнт K_{σ} для сплаву АК8, АМГ та АМЦ при вальцюванні заготовок, що мають температуру 420 °С та 470 °С.

The paper described the methodology of the research implementation on the determination of the stress state factor and calculated this factor for the АК6, АК8, АМЦ, АМГ alloys. The method using the testing results of strain resistance while sample tension on plastometer and correction factor $K_{\sigma} = n_{\sigma} \cdot n_B$, that takes into account tension condition of deformed metal and billet width influence on unit pressure (at determination of the base pressure $K_{\sigma} = P_{cp.б.} / \sigma_{0,2}$) is described. In the article, formula, obtained by the authors according to which, considering available data given on determination of $\sigma_{0,2}$, σ_{ϵ} and δ for alloys АК6, АК8, АМГ and АМЦ and K_{σ} for alloy АК6 when rolling the billets, the corrective factor K_{σ} for alloy АК8 when rolling the billets, having temperature 420 °С and 470 °С is found.

Скрябин С. А.

д-р техн. наук, проф. ВНАУ
scriabinsa@mail.ru

Гунько И. В.

канд. техн. наук, доц. ВНАУ

Чайка Д. С.

аспирант ВНАУ
chaika_ds@mail.ru

УДК 621.7.016.2- 412: 669.715

Скрябин С. А., Гунько И. В., Чайка Д. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ АК6, АК8, АМГ, АМЦ

Вальцовка заготовок под штамповку представляет собой процесс, протекающий с неравномерными обжатиями и деформациями при сложной схеме нагружения. Получение в этих условиях заготовок с заданной формой и размерами профиля зависит от правильного выбора силовых и технологических параметров вальцовки [1] и требует точного определения пластичности – способности материала пластически деформироваться при тех или иных значениях термомеханических параметров без разрушения в виде макроскопического нарушения сплошности.

Целью работы является исследование различных параметров, характеризующих сопротивление деформации при вальцовке заготовок из сплавов АК6, АК8, АМГ и АМЦ.

Вычисление запаса пластичности металла и расчет возможности его разрушения решается посредством определения напряженного и деформированного состояния металла. Для этого необходимо определить значения интенсивности скоростей деформации сдвига (H) и показателя напряженного состояния (σ/T) вдоль траекторий движения частиц в очаге деформации. Теоретическое решение этой задачи связано с определением пластичности металла в зависимости от различных термомеханических параметров (пластичность сплавов в зависимости от схемы напряженного состояния, температурно-скоростных условий и немонотонности деформации).

Результаты исследования пластичности могут быть представлены параметрическими зависимостями отражающими связь предельной степени деформации сдвига (накопленной частицей материала пластической деформации) (Λ_p) с показателями напряженного состояния (σ/T), интенсивностью скорости деформации сдвига (H), температурой (θ) и показателем немонотонности (B). Показатели напряженного состояния – это одна или несколько величин, показывающих влияние напряженного состояния на пластичность материала.

При использовании экспериментального метода испытания пластичности прокаткой образцов на клин [2], за показатель пластичности принимается величина высотной деформации $\Delta h/h$ в сечении с первой трещиной. Этот метод может быть дополнен более строгим определением величины степени деформации сдвига (Λ_p) в сечении с первой трещиной и оценкой напряженного состояния в месте разрушения. Так можно изучить пластичность не только в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования, но и от схемы напряженного состояния.

С целью моделирования на боковые поверхности образцов-моделей наносится координатная сетка с одинаковой базой (стороной квадрата). После прокатки производится фиксация изменения координатной сетки. Это позволит определить среднюю степень деформации и средний показатель напряженного состояния на боковой поверхности в любом сечении по всей длине прокатанного образца. При этом сделано предположение, что ячейки сетки деформируются монотонно. В качестве координатной сетки было взято поле «лагранжевых» линий в программе моделирования технологии объемной штамповки QForm [3], которое уже использовалось для оценки перемещения металла в очаге деформации [4] (рис. 1).

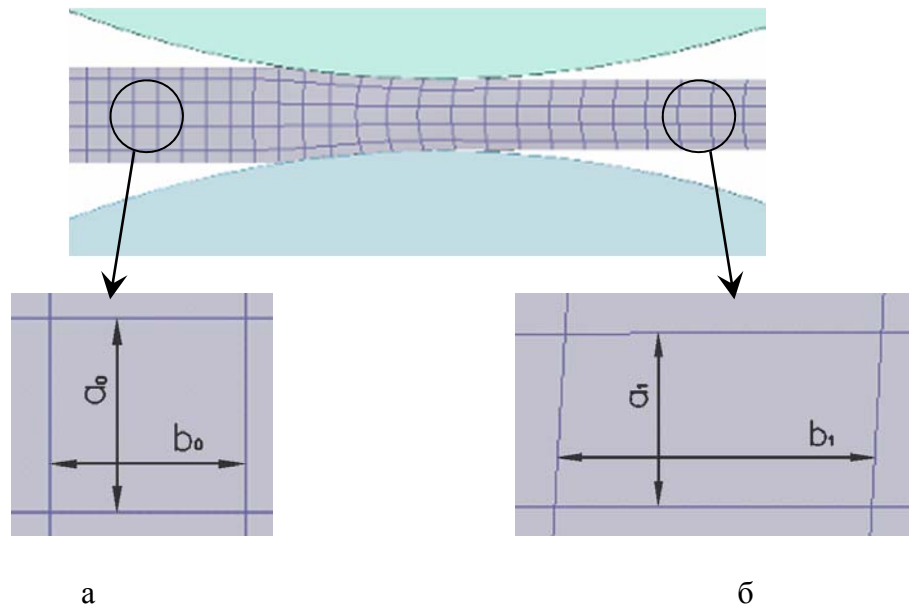


Рис. 1. Длина и ширина ячеек до (а) и после (б) прокатки

Тогда степень деформации сдвига можно определить по формуле (1) [2], (рис. 2):

$$\Lambda_p = 2 \sqrt{\left(\ln \frac{a_1}{a_0} \right)^2 + \ln \frac{a_1}{a_0} \ln \frac{b_1}{a_0} + \left(\ln \frac{b_1}{b_0} \right)^2}, \quad (1)$$

где a_1 и b_1 – длина и ширина ячейки после деформации;
 $a_0 = b_0$ – длина и ширина ячейки до деформации (база координатной сетки, рис. 1).

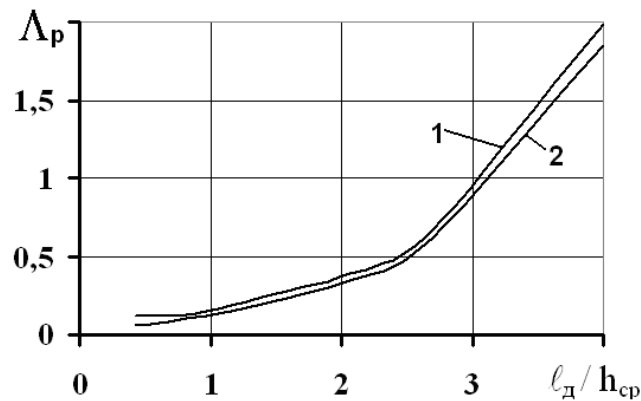


Рис. 2. Степень деформации сдвига Λ_p от коэффициента формы l_D / h_{cp} при вальцовке заготовок при температуре 420 °С (1) и 470 °С (2)

Показатель напряженного состояния, при котором осуществляется деформация до разрушения, будет определяться по формуле (2) [2], рис. 3, 4:

$$k = \frac{\sigma}{T} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{33}^2}}, \quad (2)$$

где T – интенсивность касательных напряжений;
 σ – среднее (гидростатическое) напряжение;

$\varepsilon_{11} = \ln \frac{a_1}{a_0}$, $\varepsilon_{33} = \ln \frac{b_1}{b_0}$ – степень обжатия по ширине и длине ячейки.

В таком виде показатель напряженного состояния отображает, какие напряжения преобладают в схеме напряженного состояния: $\sigma/T < 0$ – сжимающие; $\sigma/T > 0$ – растягивающие.

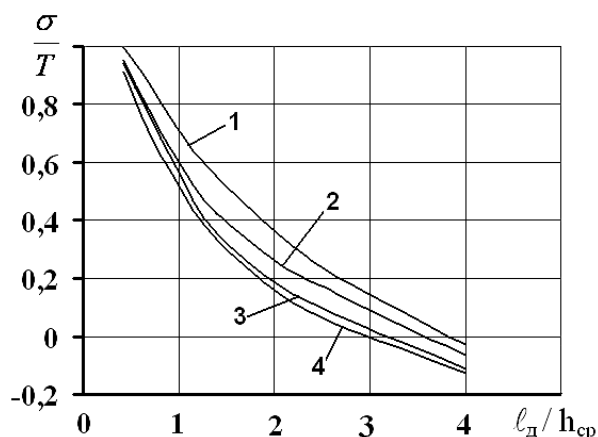


Рис. 3. Зависимость показателя напряженного состояния σ/T от коэффициента формы l_D/h_{cp} при вальцовке заготовок при температуре 420 °С из сплава:

1 – АМГ; 2 – АК6; 3 – АК8; 4 – АМЦ

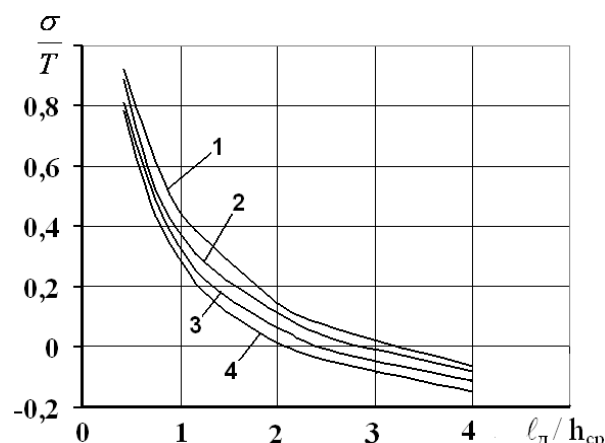


Рис. 4. Зависимость показателя напряженного состояния σ/T от коэффициента формы l_D/h_{cp} при вальцовке заготовок при температуре 470 °С из сплава:

1 – АК6; 2 – АМГ; 3 – АК8; 4 – АМЦ

На поверхности контакта существует два участка различных по характеру перемещения металла относительно поверхности валков. Для каждого из них существует свое выражение функции нормального напряжения. Определение полного давления на валки можно упростить, если ввести в рассмотрение среднее контактное напряжение (удельное давление), представляющее собой отношение суммарного давления к проекции очага деформации на горизонтальную плоскость [5]:

$$P_{cp} = P / F_K . \quad (3)$$

В работе [1] описана методика проведения исследований по определению базисного давления. Для проведения экспериментов были откованы образцы из сплава АК6 размером $18 \times 66 \times 300$ мм, термообработаны и простроганы в размер $12 \times 60 \times 300$ мм. Перед прокаткой образцы нагревались в камерной печи электросопротивления до температуры 420 и 470 °С. Перед исследованием автоматический потенциометр печи был отградуирован. Прокатку проводили на прокатном стане валками диаметром 260 мм и частотой вращения 26 мин^{-1} . Валки перед прокаткой имели температуру 20 °С. Выбранные температуры прокатки отражают граничные условия нагрева под горячую обработку давлением сплава АК6. Падение температуры образца при переносе от печи к прокатному стану компенсировалось нагревом образцов на 10–15 °С выше температуры прокатки. Измерение давления металла на валки осуществляли с помощью месдоз в виде силоизмерительного стакана и записывали показания осциллографа Н-105 на светочувствительную бумагу типа УФ. Температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой.

Коэффициент внешнего трения между прокатываемым металлом и валками определяли из условия максимального угла захвата металла валками при прокатке, среднее его значение равнялось $\approx 0,35$. Прокатку образцов проводили при обжатиях 2–60 %, что соответствовало отношению $\ell_d / h_{cp} = 0,5–3,55$, причем в интервале $\ell_d / h_{cp} = 0,5–1,8$ проводилась с нарастающим обжатием 2–3 % на каждую последующую точку, а в интервале $\ell_d / h_{cp} = 1,8–3,55$ с нарастающим обжатием 6–10 %. Минимальное число образцов для определения одного значения P_{cp} от ℓ_d / h_{cp} равнялось трем. Длина дуги принималась равной $\ell_d = \sqrt{R \Delta h}$. Средняя ширина контактной поверхности по размерам заготовки до и после прокатки b_{cp} . Средняя высота заготовки h_{cp} в очаге деформации определялась аналогично. Следовательно, условия метода определения базисного усилия полностью выдержаны, т. е. $b/h = 5$, а прокатка велась в более широком диапазоне степеней деформации, чем предусматривается этим методом.

При небольших степенях деформаций наблюдается проработка только поверхностных слоев металла, сопротивление деформации которых значительно. При этом контактная поверхность соприкосновения металла с валком небольшая, и здесь для деформации поверхностных слоев металла необходимо применить большое общее усилие.

Поэтому при высоком общем усилии и небольшой контактной поверхности наблюдаются высокие средние удельные усилия. С увеличением степени обжатия, контактная площадь возрастает, деформация проникает в глубинные слои металла. Здесь уже наблюдается уменьшение значений средних удельных усилий. Результаты экспериментальных данных при определении P_{cp} методом базисного давления показали, что при определении усилия вальцовки заготовок можно пользоваться данными, полученными при растяжении на пластометре (зависимости предела текучести от температуры и скорости деформации) [6], рис. 3, вводя поправочный коэффициент [1, 7, 8]:

$$K_{\sigma} = n_{\sigma} \cdot n_B, \quad (4)$$

где n_{σ} – коэффициент напряженного состояния деформируемого металла, учитывающий влияние внешнего трения, внешних зон и натяжения металла;

n_B – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на удельное усилие.

При определении среднего усилия, полученного методом базисного давления, используется формула:

$$P_{cp.б.} = \sigma_{0,2} \cdot K_{\sigma}, \quad (5)$$

где $\sigma_{0,2} = \sigma_T$ – предел текучести металла, значения которого получены способом растяжения на пластометре при заданных температурах и скоростях деформации.

На рис. 5 представлена зависимость $P_{cp.б.}$ от ℓ_d / h_{cp} . Проведенные эксперименты показали, что при температурах прокатки 420 и 470 °С сплава АК6, значения $P_{cp.б.}$ находятся соответственно при отношениях $\ell_d / h_{cp} = 1,4$ и 1,0.

Скорость деформации для расчетов определяется по формуле [1]:

$$u = (v_B / h_0) \cdot \sqrt{\Delta h / R}, \quad (6)$$

где v_B – окружная скорость валков, м/с;

h_0 – начальная величина заготовки, мм;

Δh – абсолютное обжатие, мм;

R – радиус валков, мм.

Окружная скорость валков рассчитывалась по формуле:

$$v_B = \pi \cdot d \cdot n / 60, \quad (7)$$

где d – диаметр валков, мм;

n – частота вращения валков, мин⁻¹.

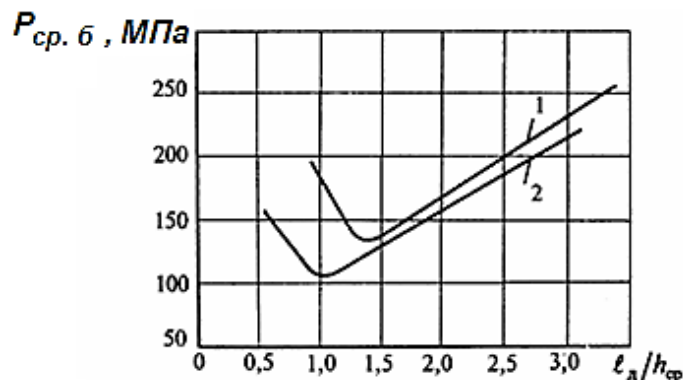


Рис. 5. Базисное давление при вальцовке заготовок из сплава АК6 при температуре: 1 – 420 °C; 2 – 470 °C

Изменение зависимости $P_{ср.б.}$ от $l_d/h_{ср}$ слева от точки минимума определяют в основном внешние зоны, которые вызывают существенное повышение нормального напряжения на протяжении всей дуги захвата [5, 9], поэтому оказывают очень малое влияние на нормальное напряжение. На зависимость, расположенную справа от точки минимума, оказывают значительное влияние в основном силы трения (контактные касательные напряжения) и незначительно внешние зоны. При небольших степенях деформаций наблюдается проработка только поверхностных слоев металла, сопротивление деформации которых значительно. При этом контактная поверхность соприкосновения металла с валком небольшая, и здесь, для деформации поверхностных слоев металла необходимо применить большое общее усилие. В точке минимума наблюдается незначительное влияние сил трения и внешних зон. То есть при $l_d/h_{ср} < 1,4$ и $1,0$ соответственно, можно предположить:

$$K_{\sigma} = n_{\sigma}'' \cdot n_B, \quad (8)$$

где n_{σ}'' – коэффициент, учитывающий влияние внешних зон – части прокатываемой заготовки, которые примыкают к геометрическому очагу деформации [9], а при $l_d/h_{ср} > 1,4$ и $1,0$ соответственно:

$$K_{\sigma} = n_{\sigma}' \cdot n_B, \quad (9)$$

где n_{σ}' – коэффициент, учитывающий влияние трения на поверхности контакта металла с валками и наличие переднего и заднего натяжения (коэффициент подпора) [9].

В статье [8] показано, что для сплава АК8 можно рассчитать поправочный коэффициент K_{σ} . На основании значений по $\sigma_{0,2}$, σ_B для сплавов АК6, АК8 [6] и данных по среднему базисному давлению ($P_{ср.б.}$) для сплава АК6 [1] при вальцовке заготовок, имеющих

температуру 420 и 470 °С (рис. 5). Для исследования сплавов АМГ и АМЦ, формулу расчета поправочного коэффициента, выведенную в работе [7], можно расширить, чтобы она учитывала большее количество параметров, влияющих на напряженное состояние при прокатке.

Отношение, показывающее насколько напряжение разрушения больше напряжения, при котором начинается пластическая деформация для данного сплава, назовем коэффициентом пластической деформации ($K_{n.д.}$):

$$K_{n.д.} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}}, \quad (10)$$

где σ_B – предел прочности в соответствии с зависимостями рис. 6;

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести сплава в соответствии с зависимостями рис. 7.

Учесть напряжение разрушения можно, сравнив пределы прочности σ_B рассматриваемых материалов. Влияние величины пластической деформации, учитывается вводом в формулу величины относительного удлинения δ (рис. 8).

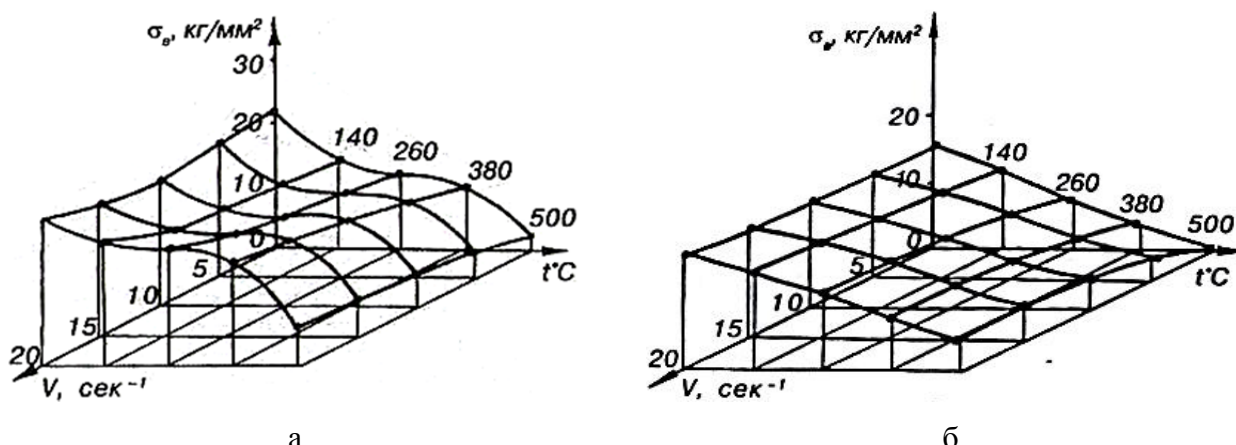


Рис. 6. Зависимость предела прочности от скорости деформации и температуры при растяжении образцов из сплавов АМГ (а) и АМЦ (б) [6]

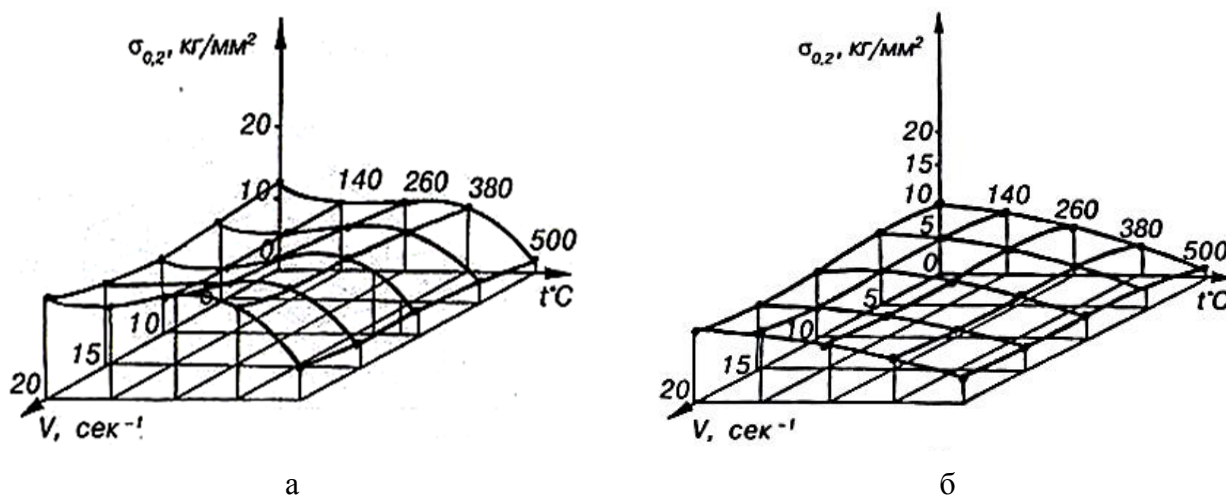


Рис. 7. Зависимость предела текучести от скорости деформации и температуры при растяжении образцов из сплава АМГ (а) и АМЦ (б) [6]

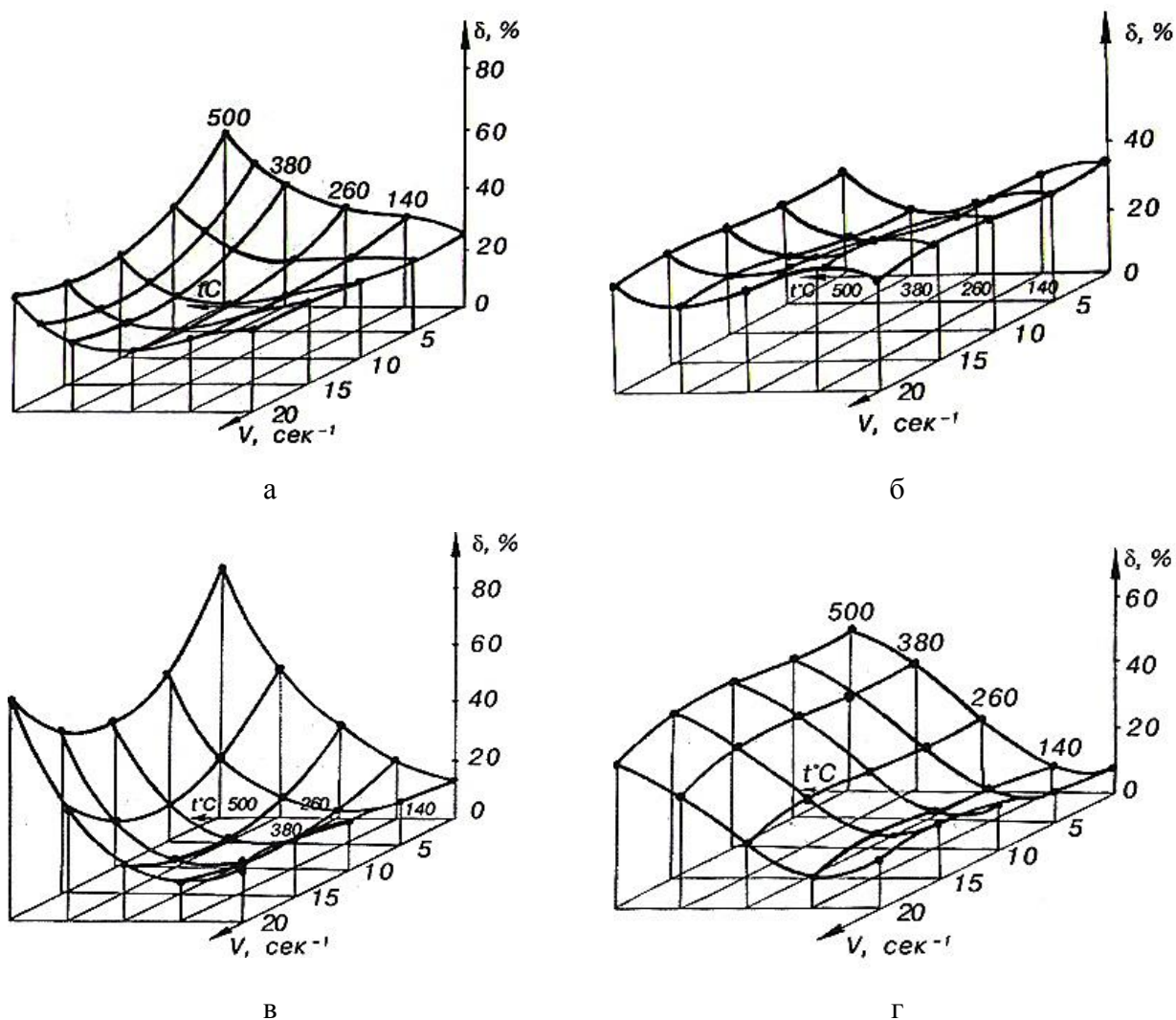


Рис. 8. Зависимость относительного удлинения от скорости деформации и температуры при растяжении образцов из сплавов АМГ (а), АМЦ (б), АК6 (в), АК8 (г) [6]

По данным, представленным на рис. 7, строим графики зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплавов АМГ и АМЦ от коэффициента формы l_d / h_{cp} при $t = 420$ °С (рис. 9) и $t = 470$ °С (рис. 10).

Поправочный коэффициент $K_\sigma = n_\sigma \cdot n_B$ учитывает напряженное состояние деформируемого металла и влияние ширины заготовки на удельное давление. Поскольку ширина заготовки для всех экспериментов берется одинаковая (60 мм), то для различных сплавов на разницу в величине K_σ влияет только напряженное состояние, поэтому принимаем:

$$\frac{K_{\sigma AK6}}{K_{\sigma(сплав)}} = \frac{K_{нл} \cdot \sigma_B \cdot \delta(AK6)}{K_{нл} \cdot \sigma_B \cdot \delta(сплав)} \cdot \left(\frac{tg \alpha}{tg \alpha_1} \right), \quad (11)$$

где $tg \alpha$ – угол, определяющий зависимость предела текучести от коэффициента формы для сплава АК6, рис. 9, 10;

$tg \alpha_1$ – угол, определяющий зависимость предела текучести от коэффициента формы для исследуемых алюминиевых сплавов (АМГ, АМЦ), рис. 9, 10, а также сплава АК8 [7].

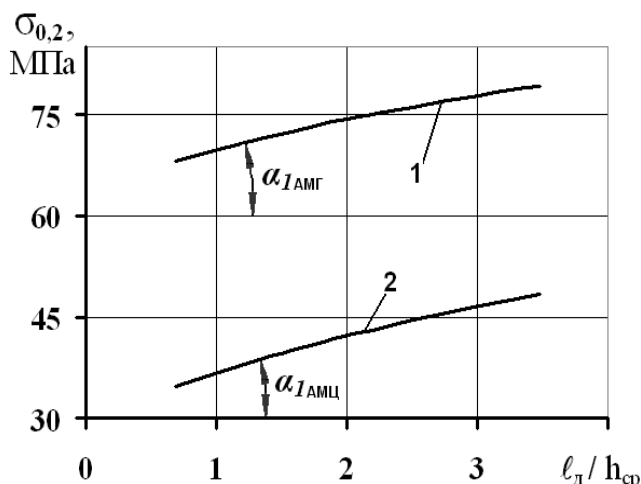


Рис. 9. Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплава АМГ (1) и АМЦ (2) при температуре вальцовки $t = 420 \text{ }^\circ\text{C}$ от коэффициента формы l_d/h_{cp} .

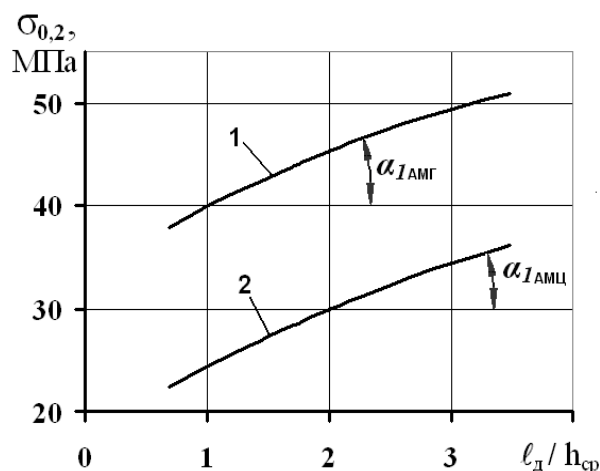


Рис. 10. Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплава АМГ (1) и АМЦ (2) при температуре вальцовки $t = 470 \text{ }^\circ\text{C}$ от коэффициента формы l_d/h_{cp} .

Имея значения базисного давления для сплава АК6 (рис. 5), пределов текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_B , относительного удлинения δ для сплавов АК6, АК8, АМГ и АМЦ (рис. 6–8), определяем по формуле (11) величину поправочного коэффициента K_σ для сплавов АК8, АМГ и АМЦ. Это позволит рассчитать по формуле (5) величину среднего базисного давления для сплавов АК8, АМГ и АМЦ при температурах $t = 420 \text{ }^\circ\text{C}$ и $470 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 11, 12).

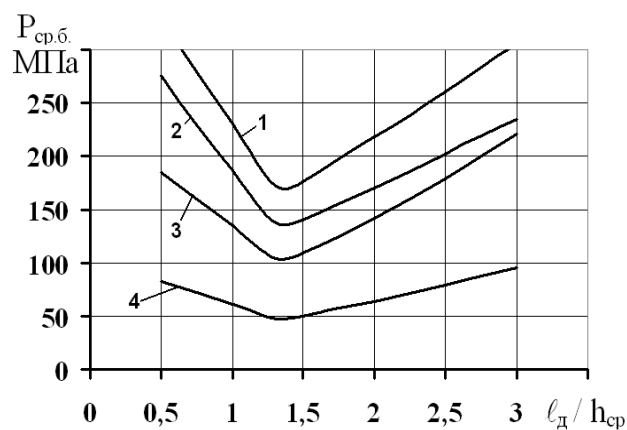


Рис. 11. Базисное давление при вальцовке заготовок при температуре $420 \text{ }^\circ\text{C}$ из сплава:

1 – АМГ; 2 – АК6; 3 – АК8; 4 – АМЦ

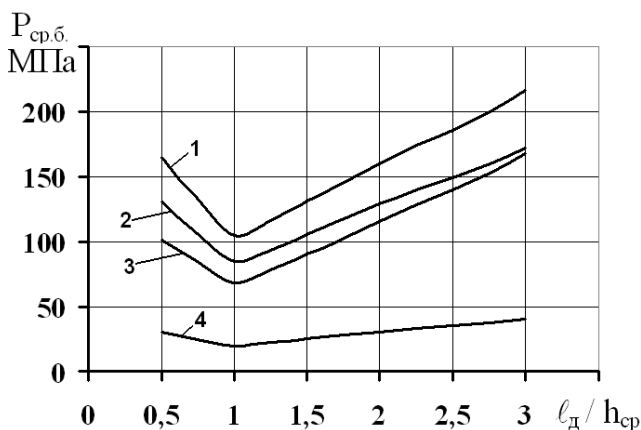


Рис. 12. Базисное давление при вальцовке заготовок при температуре $470 \text{ }^\circ\text{C}$ из сплава:

1 – АМГ; 2 – АК6; 3 – АК8; 4 – АМЦ

В работе [7] для сплава АК8 уже были построены графики зависимости базисного давления от коэффициента формы. Расчет базисного давления для сплава АК8 с использованием формулы (11) показал отклонение расчетных данных в пределах 10 % при $l_d/h_{cp} = 0,8-1,5$, что применимо для расчетов поправочного коэффициента K_σ .

Порядок расположения зависимостей показателя напряженного состояния σ/T , рис. 3, 4 и базисного давления, рис. 11, 12 для температур 420 °С и 470 °С аналогичен: АМГ, АК6, АК8, АМЦ.

ВЫВОДЫ

Учитывая достоинство базисного давления, которое дает наиболее близкий результат к реальным условиям в очаге деформации при вальцовке и прокатке, этот метод был принят в качестве основного для определения сопротивления деформации, т. е. принято равенство базисного давления $P_{ср.б.}$ и среднего удельного усилия $P_{ср.}$.

Приведено описание показателей, характеризующих пластичность металла: степень деформации сдвига (Λ_p) и показатель напряженного состояния (σ/T), а также приведена методика их расчета и зависимости этих показателей от коэффициента формы $\ell_d / h_{ср.}$ для сплавов АК6, АК8, АМГ и АМЦ.

Описана методика проведения исследований по определению базисного давления. Дано объяснение характера поведения зависимостей базисного давления $P_{ср.б.}$ от коэффициента формы $\ell_d / h_{ср.}$ при $\ell_d / h_{ср.} < 1,4$ и $\ell_d / h_{ср.} > 1,4$.

Описан метод, использующий результаты испытания сопротивления деформации при растяжении образцов на пластометре и поправочный коэффициент $K_\sigma = n_\sigma \cdot n_B$, учитывающий напряженное состояние деформируемого металла (коэффициент внешних зон при $\ell_d / h_{ср.} < 1,4$, коэффициент трения при $\ell_d / h_{ср.} > 1,4$), а также влияние ширины заготовки на удельное давление.

Приведена полученная формула, используемая в расчете поправочного коэффициента K_σ , при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов, имеющих температуру 420 °С и 470 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрябин С. А. Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах / С. А. Скрябин. – Винница : А. Власюк, 2007. – 284 с.
2. Пластичность и разрушение / под ред. В. Л. Колмогорова. – М. : Металлургия, 1977. – 336 с.
3. QForm 3D – конечно-элементная программа для расчета процессов пластической деформации металлов и сплавов, ©1991-2010, ООО «КванторФорм» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.qform3d.com.
4. Скрябин С. А. Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках [Электронный ресурс] / С. А. Скрябин, В. Л. Калюжный, Д. С. Чайка // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2008. – № 3Е(14). – С. 47–155. – Режим доступа: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VDDMA/2008-3e14/pdf/24.pdf>.
5. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
6. Микляев П. Г. Атлас тройных диаграмм пластичности и сопротивления деформации алюминиевых сплавов / П. Г. Микляев, В. М. Дуденков, Г. Д. Лебедев. – М. : ВИЛС, 1975. – 180 с.
7. Скрябин С. А. Научное обоснование, исследование, разработка и внедрение малоотходных технологических процессов вальцовки заготовок из алюминиевых и титановых сплавов : дис. д-ра техн. наук / С. А. Скрябин. – М. : МАТИ, 1990. – 438 с.
8. Исследование сопротивления деформации при вальцовке заготовок / С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка, И. А. Бубновская // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2011. – № 6. – С. 104–110. – (Серія «Технічні науки»).
9. Целиков А. И. Теория прокатки / А. И. Целиков, А. И. Гришков. – М. : Металлургия, 1980. – 329 с.