

УДК 621.73

Скрябин С.А.

Гулько И.В.

Чайка Д.С.

Бубновская И.А.

(Винницький Національний Аграрний Університет)

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ ЗАГОТОВОК

У статті описана методика проведення дослідження з визначення опору деформації методом базисного тиску.

Описаний метод застосування результатів випробування опору деформації при розтяганні зразків на пластометрі, вводячи поправочний коефіцієнт $K = n_{\sigma} n_{cp}$, що враховує напружене стан металу, що деформується й вплив ширини заготовки на питомий тиск (при визначенні базисного тиску $K_{\sigma} = P_{cp} / \sigma_{0,2}$).

У статті наведена отримана авторами формула по якій, враховуючи наявні дані по визначенню $\sigma_{0,2}$, σ_s для сплавів АК6, АК8 і K_{σ} для сплаву АК6 при вальцюванні заготовок, знаходиться поправочний коефіцієнт K_{σ} для сплаву АК8 при вальцюванні заготовок, що мають температуру 420°C та 470°C.

The methods of the undertaking the researching on determination of the deformation resistance by method of the base pressure is described.

The method of the using deformation resistance test result while sample tension on plastomers, introducing a correction factor $K = n_{\sigma} n_{cp}$ is described. Correction factor takes into account tension condition of deformed metal and billet width influence on unit pressure (at determination of the base pressure $K_{\sigma} = P_{cp} / \sigma_{0,2}$).

Got authors formula is brought in article on which, considering available data given on determination of $\sigma_{0,2}$, σ_s in for alloys АК6, АК8 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°C and 470°C is found.

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].

Основное уравнение пластичности записывается следующим образом:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 = 2\sigma_{\phi}^2 \quad (1)$$

При двухмерной деформации, когда отсутствует деформация в направлении оси z, а также если направления напряжений σ_x и σ_y совпадают с главными осями напряжений, уравнение пластичности принимает следующий вид:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\phi} \quad (2)$$

Среднее удельное усилие при прокатке рассчитывают по формуле

$$P_{cp} = n_{\sigma} n_b \sigma_{\phi}, \quad (3)$$

где n_b - коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на удельное усилие; σ_{ϕ} - фактическое сопротивление металла деформированию, отвечающее заданной температуре, степени и скорости деформации; n_{σ} - коэффициент напряженного состояния деформируемого металла, который выражается уравнением

$$n_{\sigma} = n_{\sigma}' n_{\sigma}'' n_{\sigma}''', \quad (4)$$

где n_{σ}' , n_{σ}'' , n_{σ}''' - коэффициенты, учитывающие соответственно влияние внешнего трения, внешних зон и натяжения или подпора.

Принимаем, что максимальное главное напряжение σ_1 равномерно распределено по контактной поверхности и равно среднему удельному усилию P_{cp} , т. е. $\sigma_1 = P_{cp}$. Так как в условиях двухмерной деформации $n_b = 1$, а натяжение n_{σ}''' отсутствует, то уравнение среднего удельного усилия можно представить в виде

$$P_{cp} = n'_{\sigma} n_{\sigma}'' \sigma_{\phi}, \quad (5)$$

а уравнение пластичности формулой

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{\phi}. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6) при условии $\sigma_1 = P_{cp}$, получаем

$$\sigma_{\phi} + \sigma_3 = n_{\sigma}' n_{\sigma}'' \sigma_{\phi}$$

или

$$n_{\sigma}' \cdot n_{\sigma}'' - 1 = \sigma_3 / \sigma_{\phi} \quad (7)$$

При плоском напряженном состоянии $\sigma_3 = 0$, поэтому

$$n_{\sigma}' \cdot n_{\sigma}'' - 1 = 0, \text{ или } n_{\sigma}' n_{\sigma}'' = 1.$$

А. И. Целиков и В. В. Смирнов, а позднее и В. Ф. Пушкарев установили [2,3], что при отношении $\ell_d / h_{cp} = 1$ влияние внешних зон отсутствует и ими можно пренебречь, т. е. $n_{\sigma}'' = 1$. При прокатке в условиях $\ell_d / h_{cp} = 1$ влияние внешнего трения в продольном направлении минимально, значение продольного напряжения минимально и им можно пренебречь. Таким образом, $\sigma_3 \approx 0$; $\sigma_2 \neq 0$; $\sigma_1 \neq 0$, т. е. получаем схему плоского напряженного состояния.

Формулу А. И. Целикова можно представить в виде

$$P_{cp} = K/n (\ell^n - 1), \quad (8)$$

где K - истинное сопротивление деформации при температуре, скорости и степени деформации, соответствующих реальному процессу прокатки;

$$n = \mu \ell_d / h_{cp}.$$

Коэффициент напряженного состояния

$$n'_{\sigma} = P_{cp} / K = \frac{\ell^n - 1}{n} = \frac{\ell^{\mu \frac{\ell_d}{h_{cp}}} - 1}{\mu \frac{\ell_d}{h_{cp}}},$$

при $\ell_d / h_{cp} = 1$ получаем $n'_{\sigma} = (\ell^{\mu} - 1) / \mu$.

Разложим данное выражение в ряд по степеням μ :

$$n'_{\sigma} = 1 + \mu/2 + \mu^2/6 + \dots$$

Среднее значение напряженного состояния при $\ell_d = h_{cp}$ находится в прямой зависимости от коэффициента трения μ , т. е. $n'_{\sigma} = f(\mu)$. При $\mu \rightarrow 0$ коэффициент напряженного состояния стремится к 1, т. е. $n'_{\sigma} = 1$; $1 = P_{cp} / K$ или $P_{cp} = K$.

Учитывая достоинство метода базисного давления, который дает наиболее близкий результат к реальным условиям в очаге деформации при вальцовке и прокатке, этот метод рекомендован в качестве основного для определения сопротивления деформации, т. е. приняли равенство базисного давления $P_{cp,б}$ и среднего удельного усилия $P_{cp,б} = P_{cp} = K$.

В работе [4] описана методика проведения исследований по определению базисного давления. Для проведения экспериментов были откованы образцы из сплава АК6 размером 18X66X300 мм, термообработаны и простроганы в размер 12X60X300 мм. Перед прокаткой образцы нагревались в камерной печи электросопротивления до температур 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°C . 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 $10 - 15^\circ\text{C}$ 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 и среднее его значение равнялось $\approx 0,35$. Прокатку образцов проводили при обжатиях $2 - 60\%$, что соответствовало отношению $\ell_d / h_{\text{ср}} = 0,5 - 3,55$, причем в интервале $\ell_d / h_{\text{ср}} = 0,5 - 1,8$ проводилась с нарастающим обжатием $2 - 3\%$ на каждую последующую точку, а в интервале $\ell_d / h_{\text{ср}} = 1,8 - 3,55$ - с нарастающим обжатием $6 - 10\%$. Минимальное число образцов для определения одного значения $P_{\text{ср}}$ от $\ell_d / h_{\text{ср}}$ равнялось трем.

Среднее удельное усилие определялось по формуле

$$P_{\text{ср}} = P / F_{\text{к}}, \quad (9)$$

где P - давление, измеренное месдозами; $F_{\text{к}} = V_{\text{ср}} \sqrt{R\Delta h}$ — площадь контактной поверхности.

Длина дуги принималась равной $\ell_d = \sqrt{R\Delta h}$. Средняя ширина контактной поверхности по размерам заготовки до и после прокатки - $b_{\text{ср}}$. Средняя высота заготовки $h_{\text{ср}}$ 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.

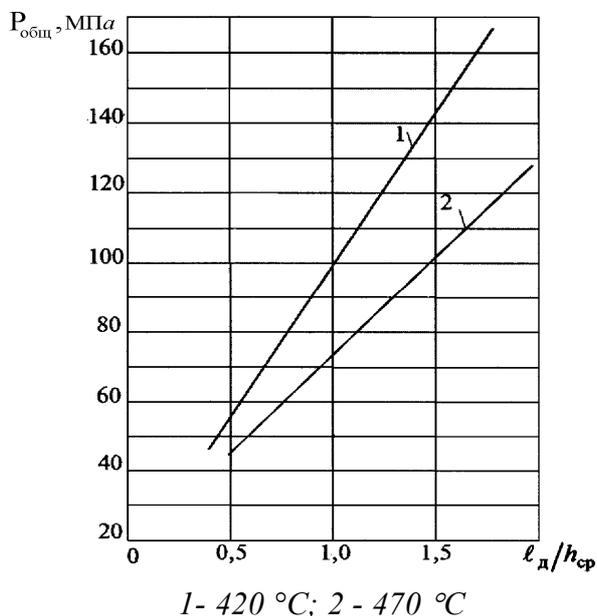


Рис. 1. - Общее усилие при вальцовке эталонных образцов для определения базисного давления при температуре

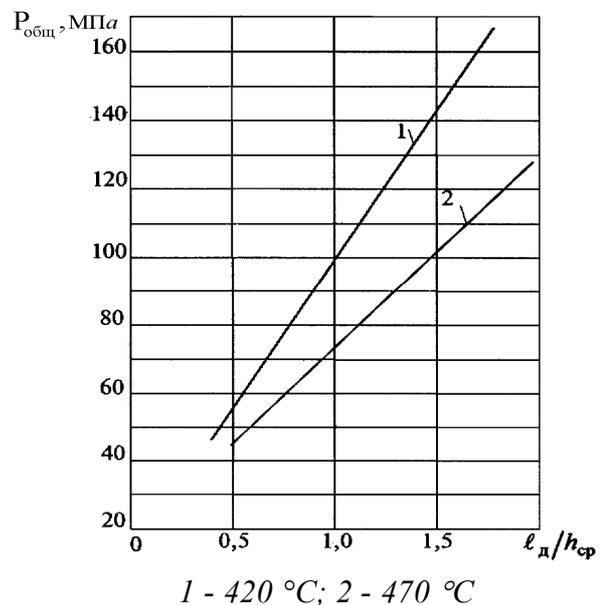


Рис. 1. - Общее усилие при вальцовке эталонных образцов для определения базисного давления при температур.

На рис. 1 представлены результаты экспериментов по определению зависимости общего усилия P от отношения $\ell_d / h_{\text{ср}}$ [4]. Повышение значений общего усилия с увеличением $\ell_d / h_{\text{ср}}$ объясняется тем, что площадь контакта металла и валков

увеличивается. При этом возрастают силы трения на контактных поверхностях, направленные к нейтральному сечению, а в результате сопротивления перемещению металла вдоль оси заготовки увеличивается и вследствие этого растет давление металла на валки.

На рис. 2 представлена зависимость $P_{ср}$ от $\ell_d / h_{ср}$. Проведенные эксперименты показали, что при температурах прокатки 420 и 470°C сплава АК6 значения $P_{ср}$ находятся соответственно при отношениях $\ell_d / h_{ср} = 1,4$ и 1,0. Экспериментальные данные показывают, что при небольших степенях деформации и соответственно отношений $\ell_d / h_{ср}$ значения базисного давления высокие. По мере увеличения деформации снижаются до определенных значений, затем плавно возрастают. А. И. Целиков и А. И. Гришков [2] считают, что изменение зависимости $P_{ср}$ от $\ell_d / h_{ср}$ слева от точки минимума определяют в основном внешние зоны и незначительно контактные силы трения, а зависимость, расположенную справа от точки минимума, - в основном силы трения и незначительно внешние зоны. В точке минимума наблюдается незначительное влияние сил трения и внешних зон.

Есть другая точка зрения на характер изменения зависимости $P_{ср}$ от $\ell_d / h_{ср}$ [1, 4]. 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.

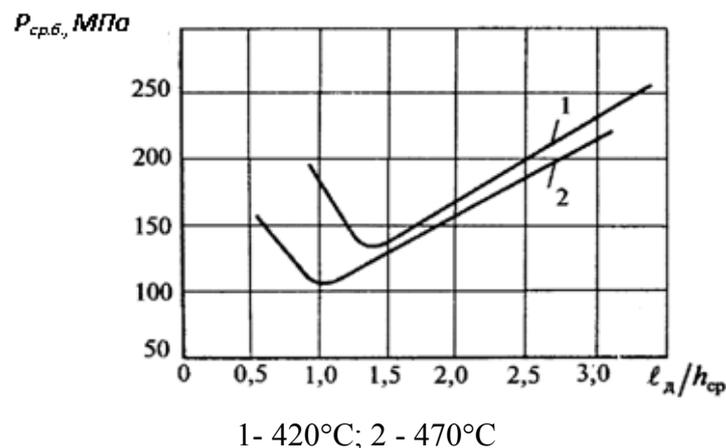


Рис. 2. - Базисное давление при вальцовке заготовок из сплава АК6 при температуре

Поэтому при значительном 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 $P_{ср}$ методом базисного давления показали, что при определении усилия вальцовки заготовок можно пользоваться данными, полученными при растяжении на пластометре, рис. 3, [5], вводя поправочный коэффициент [4]. Известно, что $P_{ср} = n_{\sigma} n_{v} \sigma_{\phi}$.

Для горячей прокатки

$$\sigma_{\phi} = n_{\tau} n_{v} \sigma_{\tau}, \quad (10)$$

где n_{τ} и n_{v} — коэффициенты, учитывающие влияние на сопротивление деформации соответственно температуры и скорости деформации.

При определении σ_{τ} способом растяжения на пластометре коэффициенты n_{τ} и n_{v} должны учитываться, так как разрыв или осадка образца происходит при заданных

температурах и скоростях деформации. Остальные коэффициенты, входящие в формулу (3) для определения $P_{cp,6}$, можно обозначить поправочным коэффициентом которым учитывают напряженное состояние деформируемого металла и влияние ширины заготовки на удельное давление.

$$K_{\sigma} = n_{\sigma} n_{v}, \quad (11)$$

При определении базисного давления

$$K_{\sigma} = P_{cp,6} / \sigma_{0,2}, \quad (12)$$

где $P_{cp,6}$ - среднее удельное усилие, полученное методом определения базисного давления; $\sigma_{0,2} = \sigma_T$ - предел текучести металла, значения которого получены способом растяжения на пластометре при заданных температурах и скоростях деформации.

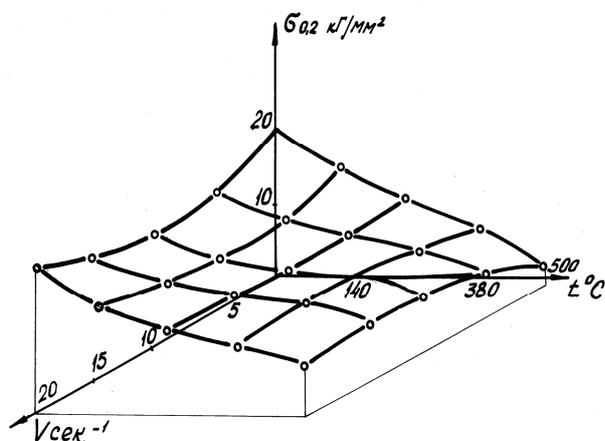


Рис. 3. - Зависимость предела текучести от скорости деформации и температуры при растяжении образцов из сплава АК6 [5]

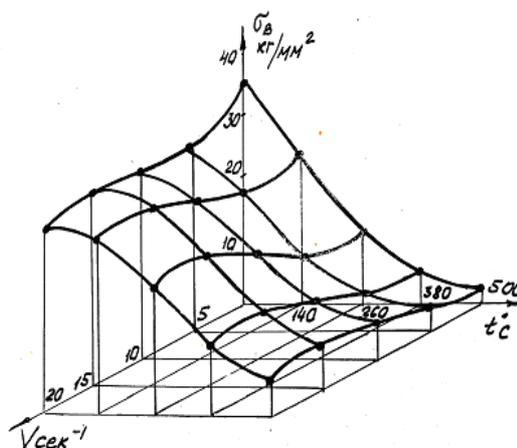


Рис. 4. - Зависимость предела прочности от скорости деформации и температуры при растяжении образцов из сплава АК6 [5]

Обработка результатов экспериментов, полученных при определении $P_{cp,6}$ и предела текучести $\sigma_{0,2} = \sigma_T$ полученного при растяжении на пластометре (рис. 3) при заданных температурах и скоростях деформации сплава АК6 показала, что поправочный коэффициент $K_{\sigma} = 1,18 - 0,96$ для температуры вальцовки 420 °С и скорости деформации 3,37 - 10,97 с⁻¹; $K_{\sigma} = 1,08 - 0,8$ для температуры вальцовки 470 °С и скорости деформации 3,03 - 10,3 с⁻¹.

Скорость деформации определялась по формуле [3]

$$u = (v_B/h_0) \sqrt{\Delta h / R}, \quad (13)$$

где v - 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

$$v = \pi d n / 60, \quad (14)$$

где d - диаметр валков, мм; n - частота вращения валков, мин⁻¹.

На рис. 4 представлена зависимость предела прочности сплава АК6 от скорости деформации и температуры при растяжении образцов на пластометре, а на рис. 5, 6 зависимости пределов текучести и прочности сплава АК8.

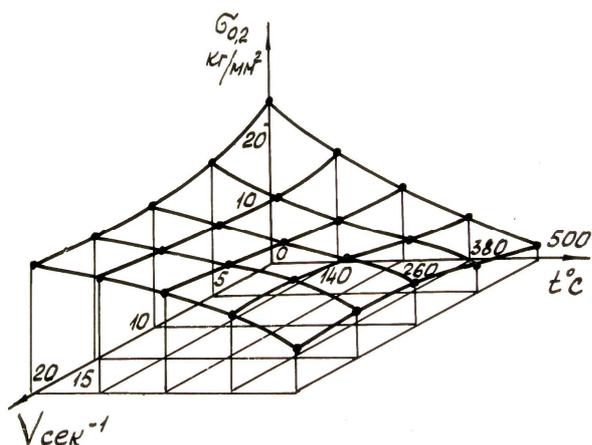


Рис. 5. - Зависимость предела текучести от скорости деформации и температуры при растяжении образцов из сплава АК8 [5]

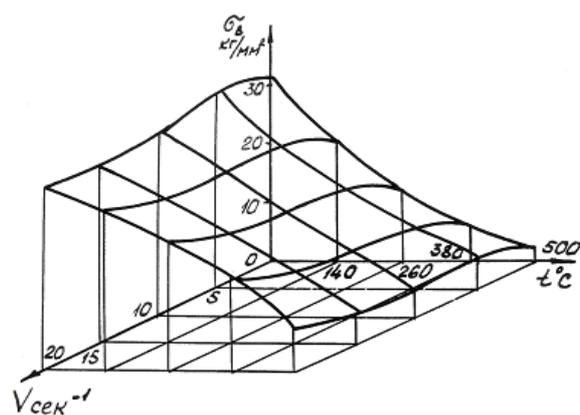


Рис. 6. - Зависимость предела прочности от скорости деформации и температуры при растяжении образцов из сплава АК8 [5]

Для определения базисного давления при вальцовке сплава АК8, находим по рис. 2 минимальное базисное давление сплава АК6. При температуре 470°C - значение $P_{срб}$, в зависимости от величины коэффициента формы $P_{срб}$ ($l_d/h_{ср} = 1$), составляет 105 МПа, а при температуре 420°C - значение $P_{срб}$ ($l_d/h_{ср} = 1,4$) = 135 МПа.

По данным представленным на рис. 2, строим графики зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплавов АК6 и АК8 от коэффициента формы $l_d/h_{ср}$ при $t = 420^\circ\text{C}$ (рис. 7) и $t = 470^\circ\text{C}$ (рис. 8).

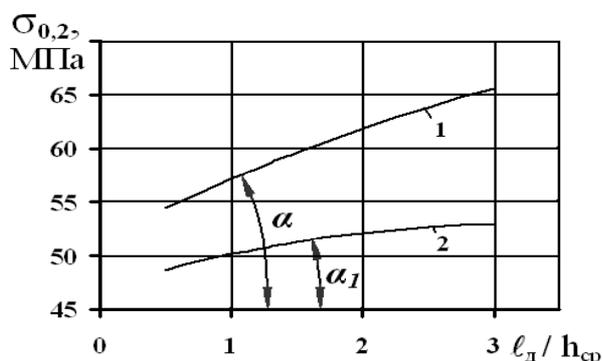


Рис. 7. - Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплава АК6 (1) и АК8 (2) при температуре вальцовки $t = 420^\circ\text{C}$ от коэффициента формы $l_d/h_{ср}$.

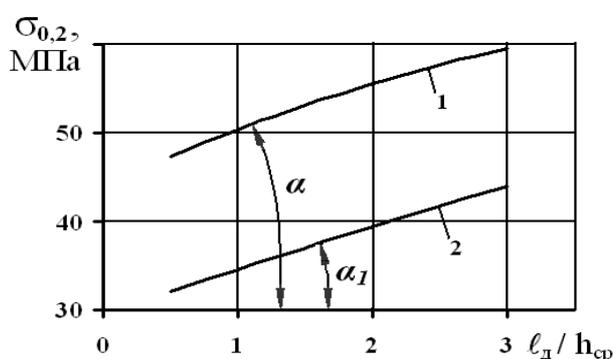


Рис.8. - Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ сплава АК6 (1) и АК8 (2) при температуре вальцовки $t = 470^\circ\text{C}$ от коэффициента формы $l_d/h_{ср}$.

Поправочный коэффициент $K_\sigma = n_\sigma / n_b$ 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

$$K_{\sigma_{AK6}} - K_{\sigma_{AK8}} = \frac{\sigma_B / \sigma_{0,2} AK6}{\sigma_B / \sigma_{0,2} AK8} (\text{tg}\alpha - \text{tg}\alpha_1), \quad (15)$$

где σ_B - предел прочности в соответствии с зависимостями рис. 5; $\text{tg}\alpha$ и $\text{tg}\alpha_1$ - углы определяющие зависимость предела текучести от коэффициента формы.

Имея значения базисного давления для сплава АК6 (рис.2) пределов текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_b для сплавов АК6, АК8 (рис. 3 - 6) определяем по формуле (12) величину поправочного коэффициента K_σ для сплава АК8.

Зная величину поправочного коэффициента K_σ для сплава АК6, рассчитываем K_σ для сплава АК8 по формуле (15). Это позволит рассчитать по формуле $P_{\text{ср.б.}} = \sigma_{0,2} \cdot K_\sigma$, величину среднего базисного давления для сплава АК8 при температурах $t = 420^\circ\text{C}$ и 470°C (рис. 9).

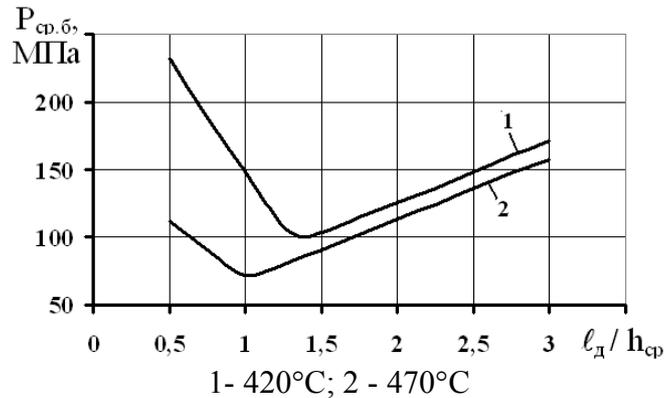


Рис. 9. - Базисное давление при вальцовке заготовок из сплава АК8 при температуре

Выводы

1. Учитывая достоинство базисного давления, который 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 $P_{\text{ср.б.}}$ и среднего удельного усилия $P_{\text{ср.}}$.

2. В статье описана методика проведения исследований по определению базисного давления. Дано объяснение характера поведения зависимостей базисного давления $P_{\text{ср.б.}}$ от коэффициента формы $l_d / h_{\text{ср}}$.

3. Описан метод применения результатов испытания сопротивления деформации при растяжении образцов на пластометре, вводя поправочный коэффициент $K_\sigma = n_\sigma / n_b$, учитывающий напряженное состояние деформируемого металла и влияние ширины заготовки на удельное давление.

При определении базисного давления $K_\sigma = P_{\text{ср.б.}} / \sigma_{0,2}$.

4. В связи с тем, что на разницу в величине K_σ для различных сплавов влияет только напряженное состояние, в статье приведена полученная авторами формула, по которой учитывая имеющиеся данные по определению $\sigma_{0,2}$, σ_b для сплавов АК6, АК8 и K_σ для сплава АК6, находится поправочный коэффициент K_σ для сплава АК8 при вальцовке заготовок, имеющих температуру 420°C и 470°C .

Литература

1. Скрябин С.А. Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах. / Скрябин С.А. // – Винница: А. Власюк. – 2007. – 284 с.
2. Целиков А.И. Теория прокатки. /Целиков А.И., Гришиков А.И. // – М.: Металлургия, 1980. - 329 с.
3. Целиков А.И. К методике определения сопротивления деформации на прокатном стане. Известия ВУЗов./Целиков А.И.// – М.: Машиностроение, - №11, 1973. – 114 с.
4. Скрябин С.А. Научное обоснование, исследование, разработка и внедрение малоотходных технологических процессов вальцовки заготовок из алюминиевых и титановых сплавов. / Скрябин С.А.//. Дисс. д.т.н.- М.: МАТИ, 1990. – 438 с.
5. Микляев П. Г. Атлас тройных диаграмм пластичности и сопротивления деформации алюминиевых сплавов./ Микляев П. Г., Дуденков В. М., Лебедев Г. Д. // — М: ВИЛС, 1975. – 180 с.