

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ

© 2016 г. Н.Н. Загиров, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, В.М. Беспалов

Сибирский федеральный университет (СФУ), г. Красноярск

*Статья поступила в редакцию 04.04.14 г., доработана 14.10.15 г., подписана в печать 19.10.15 г.*

Приведены результаты решения задачи по определению возможности реализации процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП). В аналитическом виде записаны составляющие полной мощности для исследуемого процесса, с помощью разработанной программы на ЭВМ произведен их расчет и проанализировано влияние отдельных факторов на осуществление процесса СПП. Для условий совмещенной прокатки-прессования алюминиевых сплавов на опытно-промышленной установке совмещенной обработки дана количественная оценка возможности реализации процесса с использованием в качестве основного критерия коэффициента запаса мощности.

**Ключевые слова:** баланс мощностей, совмещенные прокатка и прессование, активные силы трения, деформация, коэффициент вытяжки, напряжения трения, коэффициенты трения.

**Загиров Н.Н.** — канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением (ОМД) Института цветных металлов и материаловедения СФУ (660025, г. Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95). Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: kafomd\_1@mail.ru.

**Довженко Н.Н.** — докт. техн. наук, директор Института нефти и газа СФУ, профессор той же кафедры. Тел.: (8391) 293-78-46. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru.

**Сидельников С.Б.** — докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой ОМД Института цветных металлов и материаловедения СФУ. Тел.: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Беспалов В.М.** - аспирант этой кафедры. E-mail: vmbespalov@mail.ru.

**Для цитирования:** Загиров Н.Н., Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Беспалов В.М. Расчетно-экспериментальная оценка условия реализации процесса совмещенной прокатки-прессования с использованием метода баланса мощностей // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 1. С. 19–25.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-19-25.

*Zagirov N.N., Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Bespalov V.M.*

**Computational experimental evaluation of conditions for combined extrolling process implementation using the capacity balance method**

The paper presents the results obtained when solving the problem consisting in determination of the combined extrolling process implementation. The components of a total capacity for the process studied were written in analytical form, their calculation and analysis of the effect of specific factors on implementation of the combined extrolling process was made on PC using a specially developed program. A quantitative evaluation of the process feasibility was made using safety factor as a major criterion for the conditions of aluminum alloy combined extrolling at the pilot combined processing plant.

**Key words:** capacity balance, combined extrolling, active frictional forces, strain, elongation ratio, friction stresses, friction coefficients.

**Zagirov N.N.** — Cand. Sci. (Eng.), associate prof., Department of metal forming, Institute of nonferrous metals and materials science of Siberian Federal University (SFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky rabochy, 95). Tel.: (8391) 206-37-31. E-mail: kafomd\_1@mail.ru.

**Dovzhenko N.N.** — Dr. Sci. (Eng.), director of Institute of Petroleum and natural gas engineering of SFU, prof. of the Department of metal forming. Tel.: (8391) 293-78-46. E-mail: n.dovzhenko@bk.ru.

**Sidelnikov S.B.** — Dr. Sci. (Eng.), prof., chief of the Department of metal forming, Institute of nonferrous metals and materials science, SFU. Tel.: (8391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Bespalov V.M.** — postgraduate of Department of metal forming, Institute of nonferrous metals and materials science, SFU. E-mail: vmbespalov@mail.ru.

**Citation:** Zagirov N.N., Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Bespalov V.M. Raschetno-eksperimental'naya otsenka usloviya realizatsii protsesssa sovmeshchennoi prokatki-pressovaniya s ispol'zovaniem metoda balansa moshchnostei. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 1. P. 19–25. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-19-25.

## Введение

Внедрение в производство новых методов комбинированной и совмещенной обработки цветных металлов и сплавов ставит задачу поиска решений для определения возможности реализации процесса деформации металла при одновременном осуществлении нескольких операций, например прокатки и прессования. Эта задача весьма актуальна, так как в настоящее время на Иркутском алюминиевом заводе проводятся работы по запуску установки совмещенной обработки для получения электротехнической катанки из алюминиевых сплавов способом совмещенной прокатки-прессования (СПП).

Данный метод основан на деформации длинномерной заготовки в закрытом калибре, образованном валками с выступом и кольцевой канавкой, перекрытом на выходе матрицей, расположенной на некотором расстоянии от оси валков. Основные особенности СПП — наличие активных сил трения, создаваемых валками при взаимодействии с обрабатываемым металлом, которые способствуют процессу деформации и уменьшают усилие, необходимое для выдавливания прутка. Кроме того, в процессе обработки данным способом появляется дополнительный вид знакопеременной деформации, когда по мере продвижения при прокатке металл подвергается сначала вертикальной деформации сжатия, затем горизонтальной деформации удлинения и, далее, противоположной горизонтальной деформации при распрессовке перед зеркалом матрицы. Такой переменный характер деформации способствует повышению пластичности, особенно литой заготовки, и увеличению предельно допустимой скорости прессования. Однако при различных температурно-скоростных и деформационных условиях процесса возможна ситуация, когда вращающиеся валки не могут выдавить металл через отверстие матрицы и процесс останавливается. В более ранних работах [1—3] задача поиска условий гарантированной реализации процесса решалась путем определения коэффициента, с помощью которого сопоставлялись усилие, затраченное на продавливание металла через матрицу, и усилие активных сил трения, подводимых валками. Однако этот подход можно считать приближенным, так как он не давал возможности количественно оценить вероятность осуществления процесса.

Цель данной работы состояла в оценке условий реализации процесса совмещенной про-

катки-прессования на основе сопоставления составляющих уравнения баланса мощностей и ее экспериментальной проверке.

## Постановка и решение задачи

Теоретические предпосылки для оценки энергетических затрат при продольной прокатке приведены в классических работах [4—7], а известные решения задач сортовой прокатки металла в калибрах простой формы методом баланса мощностей изложены в книгах [8, 9]. Однако задача определения условий реализации процесса совмещенной прокатки-прессования предусматривает еще и учет энергетических затрат при выдавливании металла через отверстие матрицы, для оценки которых можно воспользоваться работой [10].

С энергетической точки зрения, условия реализации СПП можно оценить путем сравнения величин мощности  $N_a$ , формируемой активными силами трения, действующими на поверхности контакта вращающихся валков с деформируемой заготовкой, и мощности  $N_p$ , затрачиваемой на осуществление процесса выдавливания металла через заданное сечение рабочего отверстия матрицы.

Будем считать, что для стабильного протекания процесса СПП необходимо, чтобы  $N_a$  была больше  $N_p$  с условным 10 %-ным запасом мощности.

Для вывода формул и расчета отдельных составляющих обеих мощностей примем следующие схему (рис. 1) и обозначения параметров, характеризующих очаг деформации при СПП, мм:  $h_0$  — начальная высота заготовки;  $b_0$  — начальная ширина заготовки;  $R_1, R_2$  — катающие радиусы валков;  $b$  — ширина калибра;  $h_1$  — минимальный зазор между валками;  $h_{зм}$  — высота зеркала матрицы;  $d_{изд}$  — диаметр прессуемого прутка;  $h_n$  — высота очага деформации в зоне прокатки;  $h_m$  — высота матрицы;  $L_{пр}$ ,  $L_{рас}$ ,  $L_{мз}$  — соответственно длины зон прокатки, распрессовки и мертвой зоны;  $L_{п}$  — длина калибрующего пояса матрицы.

Будем считать, что катающие радиусы обоих валков равны между собой:  $R_1 = R_2 = R$ . В плоскости  $BB'$  средняя по сечению скорость движения металла по зоне прокатки максимальна и определяется окружной скоростью вращения валков  $V_b$  с учетом коэффициента проскальзывания  $k_{пр}$ . Справа и слева от плоскости  $BB'$  расположены зоны отставания, в которых средняя по соответствующему сечению скорость перемещения металла изменяется с учетом условия постоянства секунд-

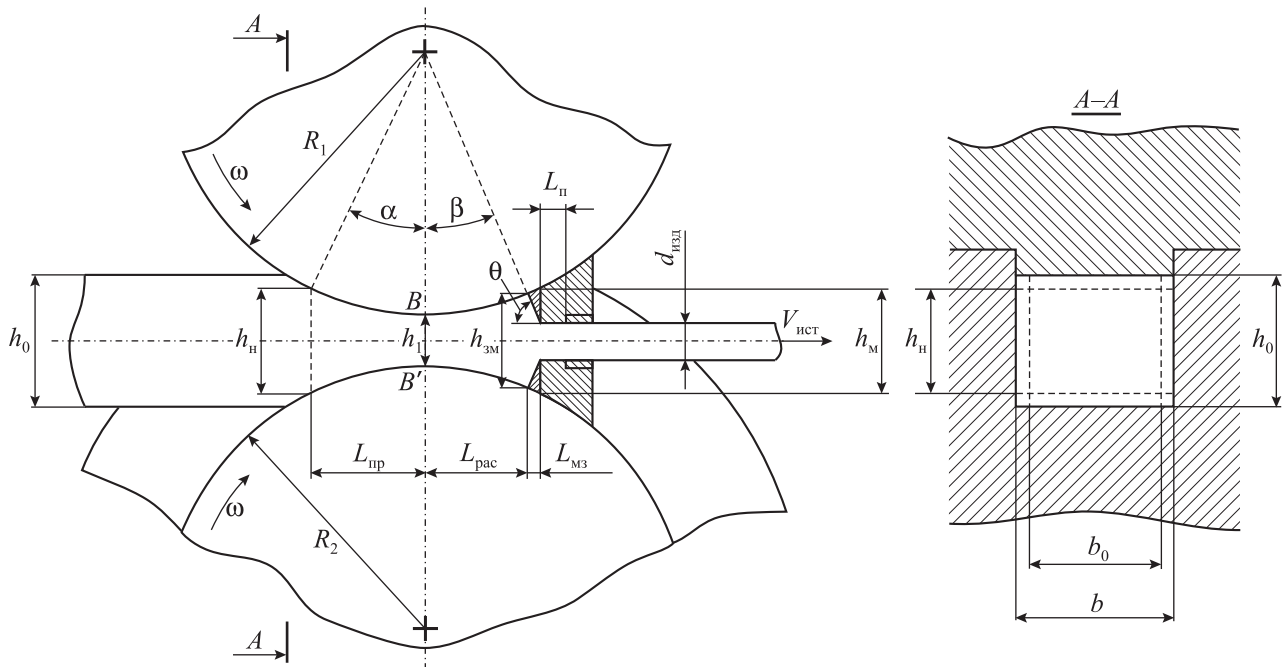


Рис. 1. Принципиальная схема совмещенной прокатки-прессования

ного объема деформируемого металла, рассчитываемого по формуле

$$V_{\text{сек}} = k_{\text{пр}} V_{\text{в}} F_1 = k_{\text{пр}} \omega R b h_1, \quad (1)$$

где  $\omega = \pi n / 30$  — угловая скорость вращения валков;  $n$  — число оборотов валков, об/мин.

Полная мощность  $N_{\text{р}}$ , которую нужно развить валками установки СПП, чтобы процесс состоялся, в общем случае складывается из следующих составляющих:

$$N_{\text{р}} = N_{\text{деф}} + N_{\text{трм}} + N_{\text{трп}}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{деф}}$  — мощность, затрачиваемая на деформацию металла без учета контактного трения;  $N_{\text{трм}}$  — мощность, необходимая для преодоления сил трения на границе упругой и пластической зон перед матрицей (зеркало матрицы);  $N_{\text{трп}}$  — мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на калибрующем пояске матрицы.

Мощность формоизменения с приемлемой для технологических расчетов точностью определяется известным выражением [7]:

$$N_{\text{деф}} = \xi \sigma_{\text{ср}} V_{\text{сек}} \ln \mu, \quad (3)$$

где  $\xi$  — коэффициент, учитывающий силы среза и неравномерность деформации, принимаемый в нашем случае из-за специфики процесса равным 2;  $\sigma_{\text{ср}} = \sqrt{\sigma_{s_0} \sigma_{s_k}}$  — величина среднего по пластической зоне сопротивления деформации;  $\sigma_{s_0}$  — начальное значение сопротивления деформации;

$\sigma_{s_k} = \sigma_{s_0} C$  — сопротивление деформации на выходе из матрицы;  $C$  — коэффициент упрочнения, зависящий от температуры, степени и длительности деформации;  $V_{\text{сек}}$  — секундный объем деформируемого металла;  $\mu$  — коэффициент вытяжки при выдавливании прутка.

Мощность, необходимая для преодоления сил трения, возникающих на зеркале матрицы (или обжимающей части пластической зоны), составляет

$$N_{\text{трм}} = \frac{F_{3\text{м}}}{\sin \theta} \tau_{\text{м}} V_{\tau_{\text{м}}} \ln \mu, \quad (4)$$

где  $F_{3\text{м}} = h_{3\text{м}} b$  — площадь зеркала матрицы;  $\theta$  — расчетный угол канала матрицы, принимаемый равным  $90^\circ$ ;  $\tau_{\text{м}} = f_{\text{м}}(\sigma_{\text{ср}} / \sqrt{3})$  — среднее значение напряжения трения в обжимающей части перед матрицей, рассчитываемое в соответствии с законом Зибеля;  $f_{\text{м}}$  — осредненный показатель трения, характеризующий условия трения на указанной поверхности;  $V_{\tau_{\text{м}}}$  — среднее значение скорости скольжения металла, равное полусумме скорости перемещения его в обжимающей части перед зеркалом матрицы и скорости истечения прутка из матрицы, т.е.

$$V_{\tau_{\text{м}}} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_{\text{сек}}}{F_{3\text{м}}} + \frac{V_{\text{сек}}}{F_{\text{изд}}} \right) = \frac{1}{2} V_{\text{сек}} \left( \frac{1}{h_{3\text{м}} b} + \frac{4}{\pi d_{\text{изд}}^2} \right).$$

Мощность, необходимая для преодоления сил

трения пресуемого металла о калибрующий пояс матрицы, равна

$$N_{\text{тр}_n} = \mu F_{\text{п}} \tau_{\text{п}} V_{\tau_{\text{п}}}, \quad (5)$$

где  $F_{\text{п}} = \Pi_{\text{изд}} L_{\text{п}}$  — площадь поверхности трения калибрующего пояса канала матрицы;  $\Pi_{\text{изд}} = \pi d_{\text{изд}}$  — периметр пресуемого прутка;  $\tau_{\text{п}} = f_{\text{п}}(\sigma_{\text{ск}}/\sqrt{3}) = f_{\text{п}}(\sigma_{\text{с}_0}/\sqrt{3})C$  — среднее значение напряжения трения на калибрующем поясе матрицы, рассчитываемое по закону Зибеля;  $V_{\tau_{\text{п}}} = V_{\text{сек}}/F_{\text{изд}}$  — скорость скольжения металла по поверхности пояса матрицы, принимаемая равной скорости истечения.

Суммарная мощность  $N_{\text{а}}$ , необходимая для осуществления процесса СПП, формируемая активными силами трения, действующими на стенках закрытого калибра, образованного валками, один из которых выполнен с ручьем, а другой с выступом, будет определяться по формуле

$$N_{\text{а}} = N_{\text{тр}_1} + N_{\text{тр}_2}, \quad (6)$$

где  $N_{\text{тр}_1}$  — мощность активных сил трения, действующих на контактных поверхностях, образованных катающими диаметрами обоих валков;  $N_{\text{тр}_2}$  — мощность активных сил трения, действующих на стенках валка с ручьем.

Если принять, что изменение высоты  $h$  в зонах прокатки и распрессовки слева и справа от плоскости  $BB'$  подчиняется выражению  $h = h_1 + R\varphi^2$  ( $\varphi$  — угол, отсчитываемой от указанной плоскости), то тогда мощность  $N_{\text{тр}_1}$  на катающих поверхностях обоих валков будет равна

$$N_{\text{тр}_1} = k_{\text{пр}} V_{\text{в}} (\tau_{\text{в}} + \tau_{\text{н}}) b R \int_0^{\alpha+\beta} \left( 1 - \frac{h_1}{h_1 + R\varphi^2} \right) d\varphi = k_{\text{пр}} V_{\text{в}} (\tau_{\text{в}} + \tau_{\text{н}}) b R \left[ (\alpha + \beta) - \sqrt{\frac{h_1}{R}} \arctg \left( \sqrt{\frac{R}{h_1}} (\alpha + \beta) \right) \right], \quad (7)$$

где  $\alpha$  — угол, определяющий дугу контакта металла с валками в зоне прокатки (см. рис. 1);  $\beta$  — угол, определяющий дугу контакта металла с валками в зоне распрессовки перед матрицей;  $\tau_{\text{в}} = f_{\text{в}}(\sigma_{\text{с}_0}/\sqrt{3})$  и  $\tau_{\text{н}} = f_{\text{н}}(\sigma_{\text{с}_0}/\sqrt{3})$  — средние значения напряжений трения соответственно на верхнем и нижнем валках, рассчитываемые по закону Зибеля;  $f_{\text{в}}$  и  $f_{\text{н}}$  — осредненные показатели трения, характеризующие условия трения соответственно на верхнем и нижнем валках.

Мощность  $N_{\text{тр}_2}$ , создаваемая силами трения на стенках валка с ручьем, при условии представления контактных поверхностей в виде прямолиней-

ной трапеции вместо реальной криволинейной, по аналогии с  $N_{\text{тр}_1}$  можно определить по формуле

$$N_{\text{тр}_2} = 2V_{\text{в}} k_{\text{пр}} \tau_{\text{с}_0} h_{\text{с}_0} R \left[ (\alpha + \beta) - \sqrt{\frac{h_1}{R}} \arctg \left( \sqrt{\frac{R}{h_1}} (\alpha + \beta) \right) \right], \quad (8)$$

где  $\tau_{\text{с}_0} = f_{\text{с}_0}(\sigma_{\text{с}_0}/\sqrt{3})$  — средние значения напряжений трения на каждой из двух боковых стенок калибра, рассчитываемые в соответствии с законом Зибеля;  $f_{\text{с}_0}$  — осредненный показатель трения, характеризующий условия трения на стенках валка с ручьем;  $h_{\text{с}_0} = 1/3(h_{\text{н}} + h_1 + h_{\text{з}_0})$  — усредненное значение высоты очага деформации в зонах прокатки и распрессовки.

В соответствии с методом баланса мощностей и принципом минимума полной мощности [5, 8] на практике будет реализован такой процесс, затраты энергии на который будут минимальными, поэтому, как уже указывалось ранее, для осуществления выдавливания металла через матрицу необходимо выполнение следующего условия:

$$N_{\text{р}} \leq N_{\text{а}}, \quad (9)$$

Подстановка выражений (3)—(5), (7) и (8) в равенство (9), в результате которой может быть записан развернутый вариант условия (9), приводит к получению достаточно громоздкого математического выражения. Поэтому с использованием представленных выше формул была разработана и реализована на ЭВМ программа расчета отдельных составляющих уравнения баланса мощностей и с ее помощью проанализировано влияние отдельных факторов на осуществление процесса СПП. В качестве критерия оценки был принят условный коэффициент запаса мощности  $K_N$ , рассчитываемый по формуле

$$K_N = \frac{N_{\text{а}}}{N_{\text{р}} K_3}, \quad (10)$$

где  $K_3 = 1,1$  — коэффициент, учитывающий, что при выдавливании части металла («уса») в зазор между валками и матрицей расходуется дополнительная энергия, которая, по экспериментальным оценкам, может составлять до 10 % от затраченной.

Вариант, при котором  $K_N > 1$ , соответствует такому сочетанию геометрических и технологических параметров, характеризующих условия протекания процесса СПП, при котором выдавливание металла через матрицу становится возможным. В качестве иллюстрации далее будет рассмотрен пример расчета показателя  $K_N$  для некоторой ком-

бинации входных параметров, максимально отражающих реальные условия осуществления процесса СПП для обработки алюминиевых сплавов на опытно-промышленной установке [11]. Значения их вместе с расчетными геометрическими и технологическими показателями, а также результаты определения составляющих уравнения баланса мощностей процесса СПП представлены ниже:

#### Входные параметры:

Катающие радиусы валков $R_1 = R_2 = R$ , мм	..... 100
Ширина калибра $b$ , мм	..... 15
Минимальный зазор между валками $h_1$ , мм	..... 7
Высота зеркала матрицы $h_m$ , мм	..... 22
Диаметр прессуемого прутка $d_{изд}$ , мм	..... 9
Длина калибрующего пояски матрицы $L_p$ , мм	..... 2
Число оборотов валков $n$ , об/мин	..... 4
Угол зеркала матрицы $\theta$ , град	..... 90
Начальная высота заготовки $h_0$ , мм	..... 14
Начальная ширина заготовки $b_0$ , мм	..... 14
Среднее сопротивление деформации по пластической зоне $\sigma_{ср}$ , МПа	..... 40
Коэффициент трения на катающих поверхностях валков $f_b, f_n$	..... 1
Коэффициент трения на стенках валка с ручьем $f_{ср}$	..... 0,8
Коэффициент трения на обжимающем и калибрующем участках матрицы $f_m$	..... 0,6
Коэффициент упрочнения металла при прессовании прутка $C$	..... 2,0
Коэффициент, учитывающий неравномерность деформации, $\xi$	..... 2,0
Коэффициент проскальзывания $k_{пр}$	..... 1

#### Расчетные геометрические и технологические параметры:

Высота распрессованной заготовки на входе в очаг деформации в зоне прокатки $h_n$ , мм	..... 13,96
Высота распрессованной заготовки на входе в очаг деформации в зоне прессования $h_{мз}$ , мм	..... 21,81
Угол, определяющий длину очага деформации в зоне прокатки, $\alpha$ , град	..... 15,16
Угол, определяющий длину очага деформации в зоне распрессовки, $\beta$ , град	..... 22,2
Коэффициент вытяжки $\mu$	..... 5,2
Периметр прессуемого прутка $L_{изд}$ , мм	..... 28,26
Скорость истечения металла из матрицы $V_{ист}$ , мм/с	..... 69,14
Средняя скорость перемещения металла по поверхности матрицы $V_m$ , мм/с	..... 40,52
Линейная скорость вращения валков $V_b$ , мм/мин	..... 41,87

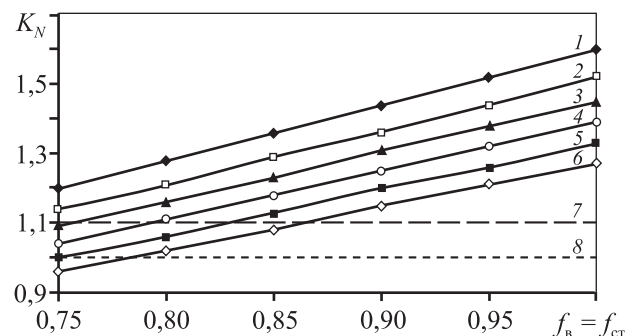
Напряжение трения в обжимающей части матрицы $\tau_m$ , МПа	..... 19,60
Напряжение трения на калибрующем пояске матрицы $\tau_n$ , МПа	..... 27,71
Напряжение трения на катающих поверхностях валков $\tau_b, \tau_n$ , МПа	..... 23,09
Напряжение трения на стенках валка с ручьем $\tau_{ср}$ , МПа	..... 23,09

#### Значения составляющих уравнения баланса мощностей и коэффициент запаса мощности:

Мощность, затрачиваемая на процесс, $N_{деф}$ , Вт	..... 818,99
Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в обжимающей части матрицы, $N_{трм}$ , Вт	..... 482,68
Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на калибрующем пояске матрицы, $N_{трп}$ , Вт	..... 562,01
Суммарная затрачиваемая мощность $N_p$ , Вт	..... 1863,7
Мощность сил трения на поверхности катающих диаметров валков $N_{тр1}$ , Вт	..... 1387,9
Мощность сил трения на стенках валка с ручьем $N_{тр2}$ , Вт	..... 1319
Суммарная мощность активных сил трения $N_a$ , Вт	..... 2706,7
Коэффициент запаса мощности $K_N$	..... 1,45

На рис. 2 отображена динамика изменения коэффициента  $K_N$  при той же комбинации входных параметров с изменением значений коэффициентов трения  $f_i$ , отражающих возможные условия трения на контакте деформируемого металла с инструментом.

Значения коэффициентов трения на различных контактных поверхностях заданы в том диапазоне,



**Рис. 2.** Коэффициент запаса мощности при изменении значений коэффициентов трения на различных контактных поверхностях  
 1 –  $f_m = f_n = 0,50$ ; 2 – 0,55; 3 – 0,60; 4 – 0,65; 5 – 0,70; 6 – 0,75  
 7 – граница практической осуществимости процесса  
 8 – граница теоретической осуществимости процесса

который рекомендован авторами работы [10] для практических расчетов при отсутствии данных и подходящих индикаторных диаграмм: на катающих диаметрах обоих валков:  $f_b = f_n = 0,75 \div 1,0$ ; на стенках валка с ручьем:  $f_{ст} = 0,75 \div 1,0$ ; в обжимающей части матрицы:  $f_m = 0,5 \div 0,75$ ; на калибрующем пояске матрицы:  $f_{п} = 0,5 \div 0,75$ .

## Результаты исследований и их обсуждение

Из рассмотрения данных, приведенных на рис. 2, следует, что для обеспечения стабильного протекания процесса СПП необходимо стремиться к созданию на контакте обрабатываемой заготовки с валками условий трения, близких, по определению [10], к варианту деформирования металла в условиях интенсивной приварки его к поверхности инструмента, т.е. когда  $f_b = f_{ст} \geq 0,9$ . При этом на контакте металла с обжимающей и калибрующей поверхностями матрицы трение нужно минимизировать до уровня, соответствующего условиям деформирования металла при отсутствии интенсивной приварки его к инструменту, т.е. когда  $f_m = f_{п} \leq 0,75$ . Следовательно, обеспечивая в практических условиях то или иное сочетание значений показателей трения, с использованием описанного выше алгоритма, можно произвести расчеты и сделать вывод о возможности или невозможности осуществления процесса СПП при заданной комбинации геометрических и технологических параметров.

Следует отметить, что диаграммы, подобные приведенной на рис. 2, можно построить и для другого сочетания входных параметров при реализации процесса с использованием установки СПП, варьируя, например, размеры очага деформации с обеспечением заданного значения коэффициента вытяжки при прессовании и требуемых температурно-скоростных условий его осуществления. В совокупности они формируют общую картину изменения вдоль очага деформации прочностных характеристик обрабатываемого металла, в частности сопротивления деформации. Поскольку данный параметр в том или ином виде входит во все составляющие уравнения баланса мощностей, то, следовательно, от точности его определения будет существенно зависеть и корректность использования описанного выше математического аппарата.

Экспериментальные исследования, проведенные на установке совмещенной обработки [11] при

заданных параметрах (см. выше), подтвердили полученные аналитическим путем выводы об устойчивой реализации процесса СПП при получении катанки из алюминиевых сплавов.

## Заключение

Таким образом, выполнена постановка и решена задача реализации процесса совмещенной прокатки-прессования с помощью метода баланса мощностей. С использованием результатов решения можно моделировать различные варианты реализации процесса СПП, варьируя технологические и геометрические параметры, и установить закономерности изменения мощности, подводимой валками, в сравнении с мощностью, затрачиваемой на выдавливание металла. При этом проводится не только качественная, но и количественная оценка возможности осуществления процесса с применением в качестве основного критерия коэффициента запаса мощности.

Результаты исследований были использованы при проектировании опытно-промышленной установки совмещенной обработки на основе технических решений [12–15], внедряемой на Иркутском алюминиевом заводе, рассчитанной в среднем на производительность до 4 т/ч.

## Литература

1. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов. М.: МАКС Пресс, 2005.
2. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Галиев Р.И. Экспериментальные исследования формоизменения и энергосиловых параметров процесса совмещенной прокатки-прессования прутков из алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2003. No. 4. С. 49–54.
3. Сидельников С.Б., Катарева А.А., Довженко Н.Н. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и прокатки-прессования цветных металлов и сплавов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2004. No. 5. С. 34–39.
4. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки: Учеб. для студентов машиностр. и металл. вузов. М.: Металлургия, 1980.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учеб. для вузов. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001.
6. Рудской А.И., Лунев А.В. Теория и технология прокатного производства: Учеб. пос. СПб.: Наука, 2008.

7. *Агеев Л.М., Сухарев Л.М.* Теоретическое сравнение расхода энергии и коэффициента полезного действия процессов прокатки-волочения и обычной прокатки // Обработка металлов давлением: Тр. вузов РФ. Вып. 2. Свердловск: Изд-во УПИ, 1974. С. 45—52.
8. *Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В.* Калибровка прокатных валков: Учеб. пос. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Теплотехник, 2010.
9. *Смирнов В.К., Шилов В.А., Литвинов К.И.* Деформации и усилия в калибрах простой формы. М.: Metallurgiya, 1982.
10. *Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х.* Теория прессования металлов. М.: Metallurgiya, 1975.
11. *Грищенко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю., Лопатина Е.С., Галиев Р.И.* Механические свойства алюминиевых сплавов. Красноярск: СФУ, 2012.
12. *Сидельников С.Б., Беляев С.В., Довженко И.Н., Соколов Р.Е., Пещанский А.С., Плетюхин С.А., Рудницкий Э.А.* Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей: Пат. 2334574 (РФ). 2008.
13. *Сидельников С.Б., Беспалов В.М., Довженко Н.Н., Беляев С.В., Солдатов С.В., Трифоненков А.Л., Сидельников А.С.* Устройство для непрерывной прокатки и прессования изделий из цветных металлов и сплавов: Пат. 138590 (РФ). 2014.
14. *Сидельников С.Б., Беспалов В.М., Довженко Н.Н., Беляев С.В., Солдатов С.В., Трифоненков А.Л., Сидельников А.С., Федорова О.В.* Устройство для непрерывной прокатки и прессования катанки из цветных металлов и сплавов: Пат. 139085 (РФ). 2014.
15. *Баранов В.Н., Ворошилов Д.С., Галиев Р.И., Довженко И.Н., Довженко Н.Н., Лопатина Е.С., Сидельников С.Б., Солдатов С.В.* Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования: Пат. 2457914 (РФ). 2012.
- extruding of non-ferrous metals and alloys]. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2004. No. 5. P. 34—39.
4. *Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyay S.E.* Teoriya prodol'noi prokatki: Uchebnyk dlya vuzov [The theory of longitudinal rolling: Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1980.
5. *Kolmogorov V.L.* Mehanika obrabotki metallov davleniem: Uchebnyk dlya vuzov [Mechanics of metal forming: Textbook]. Ekaterinburg: UGTU—UPI, 2001.
6. *Rudskoy A.I., Lunev A.V.* Teoriya i tehnologiya prokatnogo proizvodstva: Ucheb. posobie [Theory and technology of rolling production: Textbook]. Sankt-Peterburg: Nauka, 2008.
7. *Ageev L.M., Sukharev L.M.* Teoreticheskoe sravnenie rashoda energii i koeffitsienta poleznogo deistviya protsessov prokatki-volocheniya i obychnoi prokatki [A theoretical comparison of energy consumption and efficiency for rolling-drawing processes and ordinary rolling]. In: *Obrabotka metallov davleniem [Metal forming]*: Transact. of high schools of Russian Federation. Iss. 2. Sverdlovsk: Publ. UPI, 1974. P. 45—52.
8. *Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V.* Kalibrovka prokatnih valkov: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Calibration of rolls: Textbook]. 2-nd ed. Moscow: Teplotehnik, 2010.
9. *Smirnov V.K., Shilov V.A., Litvinov K.I.* Deformatsii i usiliya v kalibrah prostoi formi [Deformations and efforts in calibers of simple form]. Moscow: Metallurgiya, 1982.
10. *Perlin I.L., Raytbarg L.Kh.* Teoriya pressovaniya metallov [Theory of metal extruding]. Moscow: Metallurgiya, 1975.
11. *Grishchenko N.A., Sidelnikov S.B., Gubanov I.Yu., Lopatina E.S., Galiev R.I.* Mekhanicheskie svoystva aluminiyevykh spлавov [The mechanical properties of aluminium alloys]. Krasnoyarsk: SFU, 2012.
12. *Sidelnikov S.B., Belyaev S.V., Dovzhenko I.N., Sokolov R.E., Peshchanskiy A.S., Pletyukhin S.A., Rudnitskiy E.A.* Ustroistvo dlya neprerivnoi prokatki i pressovaniya profilei [Device for continuous rolling and extrusion of profiles]: Pat. 2334574 (RF). 2008.
13. *Sidelnikov S.B., Bespalov V.M., Dovzhenko N.N., Belyaev S.V., Soldatov S.V., Trifonenkov A.L., Sidelnikov A.S.* Ustroistvo dlya neprerivnoi prokatki i pressovaniya izdelii iz tsvetnykh metallov i spлавov [Device for continuous rolling and extrusion of articles made from non-ferrous metals and alloys]: Pat. 138590 (RF). 2014.
14. *Sidelnikov S.B., Bespalov V.M., Dovzhenko N.N., Belyaev S.V., Soldatov S.V., Trifonenkov A.L., Sidelnikov A.S., Fedorova O.V.* Ustroistvo dlya neprerivnoi prokatki i pressovaniya katanки iz tsvetnykh metallov i spлавov [Device for continuous rolling and extrusion wire rod made from non-ferrous metals and alloys]: Pat. 139085 (RF). 2014.
15. *Baranov V.N., Voroshilov D.S., Galiev R.I., Dovzhenko I.N., Dovzhenko N.N., Lopatina E.S., Sidelnikov S.B., Soldatov S.V.* Ustroistvo dlya neprerivnogo lit'ya, prokatki i pressovaniya [Device for continuous casting, rolling and extrusion]: Pat. 2457914 (RF). 2012.

## References

1. *Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N.* Kombinirovannye i sovmeshchennyye metody obrabotki tsvetnykh metallov i spлавov [Combined and complex treatment methods of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: MAKS Press, 2005.
2. *Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Galiev R.I.* Experimental'nye issledovaniya formoizmeneniya i energosilovykh parametrov protsessа sovmeshchennoi prokatki-pressovaniya prutkov iz aluminiyevykh spлавov [Experimental research of forming and energy-power parameters of process combined rolling-extruding rods from aluminium alloys]. *Izv. vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2003. No. 4. P. 49—54.
3. *Sidelnikov S.B., Katareva A.A., Dovzhenko N.N.* Modelirovanie sovmeshchennogo protsessа neprerivnogo lit'ya i prokatki-pressovaniya tsvetnykh metallov i spлавov [Modeling combined process of continuous casting and rolling-