

УДК 621.762.4.04

## Совершенствование конструкции опытно-промышленной установки СЛИПП-2,5

**Н.Н. Довженко<sup>а</sup>, С.Б. Сидельников<sup>\*а</sup>, С.В. Беляев<sup>а</sup>,  
С.В. Солдатов<sup>б</sup>, В.М. Беспалов<sup>а</sup>, В.В. Леонов<sup>а</sup>**  
*<sup>а</sup> Сибирский федеральный университет  
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79  
<sup>б</sup> ОК «РУСАЛ ИТЦ»  
Россия 660111, Красноярск, ул. Пограничников, 37/1 <sup>1</sup>*

Received 07.12.2012, received in revised form 14.12.2012, accepted 21.12.2012

---

*В статье обосновано применение компенсирующего устройства для совершенствования конструкции опытно-промышленной установки СЛИПП-2,5 и представлена методика расчета силового нагружения прижимного устройства матрицы к валкам при изготовлении прутка из алюминиевого сплава с цирконием.*

*Ключевые слова: совмещенная прокатка-прессование, прижимное устройство матрицы к валкам, методика расчета усилий прижима.*

---

### Введение

Одним из перспективных направлений изготовления длинномерных полуфабрикатов в виде катанки, прутков или проволоки с относительно небольшим поперечным сечением из алюминиевых сплавов является применение метода совмещенного литья, прокатки и прессования (СЛИПП) [1, 2], для реализации которого учеными СФУ совместно со специалистами ООО «РУСАЛ ИТЦ» спроектирована и изготовлена модельная установка СЛИПП-2,5. Общий вид установки показан на рис. 1.

Опытный образец установки был изготовлен в 2011-2012 годах при выполнении научно-исследовательских работ при реализации государственной программы поддержки развития кооперации и использования субсидий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и ООО «РУСАЛ ИТЦ», совместно участвующих в рамках договора № 13.G25.31.0083 с Министерством образования и науки России в выполнении комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки».

---

\* Corresponding author E-mail address: sbs270359@yandex.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved



Рис. 1. Опытно-промышленная установка СЛИПП-2,5

### Конструкция установки СЛИПП-2,5

Установка СЛИПП-2,5 является физической моделью опытно-промышленной установки для изготовления электротехнической катанки из новых алюминиевых сплавов и входит в состав линии совмещенной обработки (ЛСО). Компоновка линии была разработана применительно к площадке лаборатории кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ. Общий вид линии и основные ее узлы представлены на рис. 2.

Технические характеристики установки СЛИПП-2,5 представлены в табл. 1.

Основными технологическими агрегатами ЛСО являются:

- индукционная тигельная печь для приготовления сплава и непрерывной разливки металла;
- литейная установка, предназначенная для дозированной подачи расплава в валки установки совмещенной обработки или получения непрерывно литой заготовки трапециевидного сечения;
- правильно-задающее устройство для правки литой заготовки с последующей задачей ее в валки деформирующего узла;
- установка совмещенной обработки, которая предназначена для получения из расплава или непрерывно литой заготовки в горячем состоянии пресс-изделия круглой конфигурации меньшего сечения;
- прижимное устройство с гидростанцией для обеспечения прижима инструментального матричного комплекта к валкам установки совмещенной обработки;
- узел охлаждения для охлаждения пресс-изделия до заданной температуры с последующей калибровкой и формированием бунта катанки;
- калибровочная машина, предназначенная для холодной деформации пресс-изделий и получения катанки требуемого диаметра с заданным уровнем механических свойств;

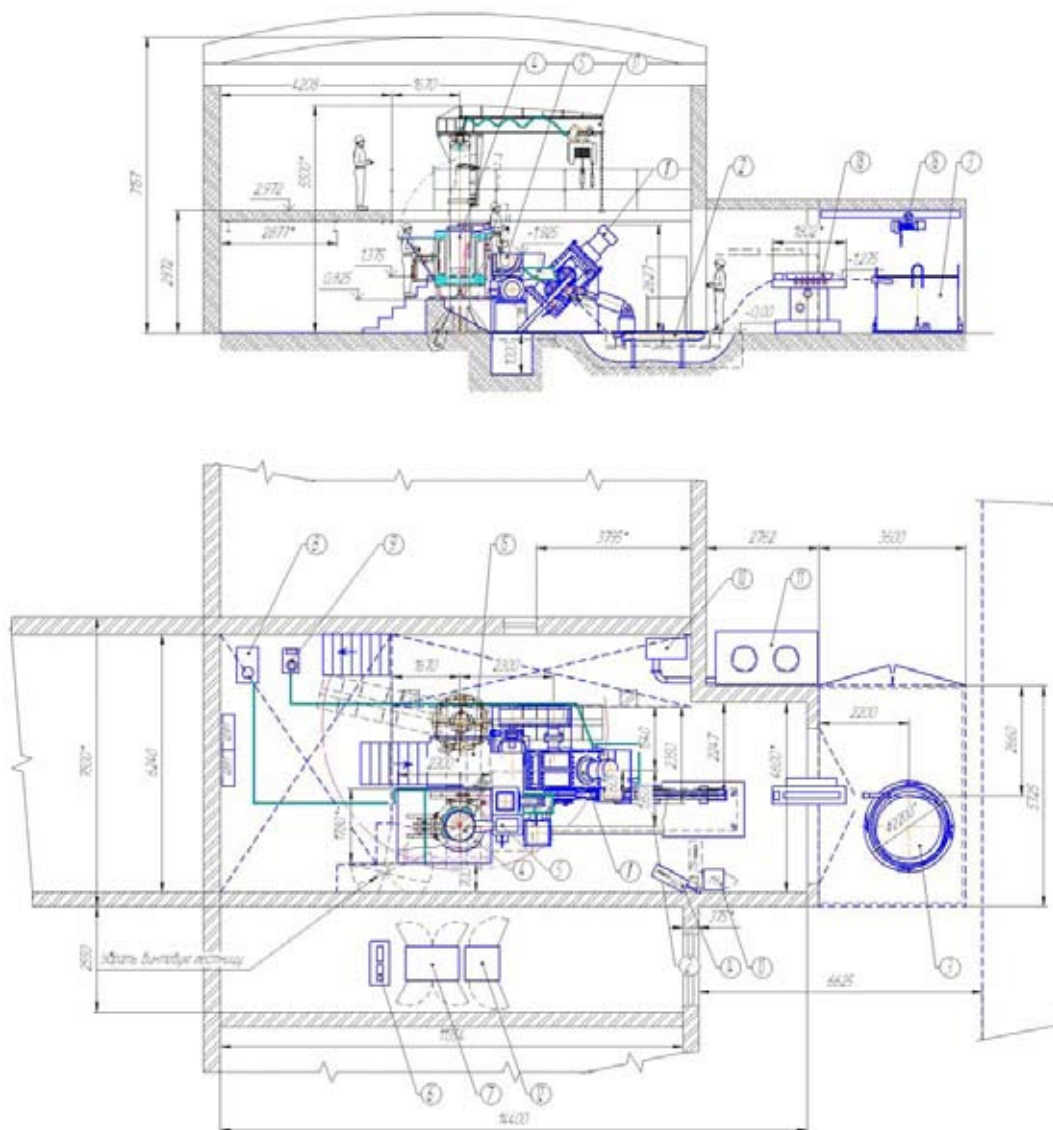


Рис. 2. Линия совмещенной обработки: 1 – установка СЛИПП с прижимным устройством; 2 – узел охлаждения; 3 – формирователь бунта; 4 – плавильная тигельная печь; 5 – система литья; 6 – блок конденсаторов; 7 – преобразователь; 8 – гидропривод наклона печи; 9 – гидропривод установки СЛИПП; 10 – блок станции охлаждения; 11 – градирня; 12 – шкаф управления; 13 – пульт управления печью; 14 – пульт управления линией, 15 – рабочая площадка; 16 – таль; 17 – кран; 18 – калибровочная машина

Таблица 1. Технические характеристики установки СЛИПП-2,5

Параметры	Значения
Начальный диаметр валка, мм	400
Длина бочки валка, мм	350
Количество оборотов валка: – минимальное – максимальное	1 15
Передаточное число редуктора	40
Мощность электродвигателя, кВт	45
Рабочее давление гидростанции, МПа	200
Производительность, т/час	2,5
Габариты, мм	3400×2350×627

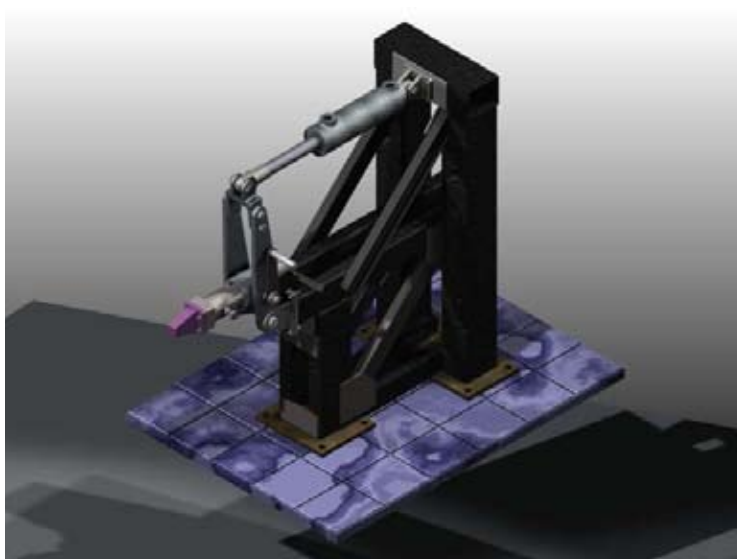


Рис. 3. Один из вариантов выполнения прижимного устройства

- ножницы для обрезки литой заготовки, пресс-изделия или катанки;
- формирователь бунта катанки или моталка со съемным барабаном, предназначенная для смотки отпрессованного изделия в бухту.

Одним из ответственных узлов установки СЛИПП является прижимное устройство, вариант выполнения которого представлен на рис. 3.

Инструментальный узел прижимного устройства состоит из следующих деталей:

- собственно матрица;
- матрицедержатель;
- инструментальная доска с крышкой, соединенная с гидравлическим прижимом;
- направляющая для крепления и передвижения матрицы по оси прессования, предназначенная для отвода и смены инструмента;

Матрица фиксируется по вертикали в матрицедержателе и изготавливается из высоколегированной инструментальной стали или карбидов вольфрама, твердых сплавов ВК6, ВК8. Матрицедержатель снабжен буртом, опускается в инструментальную доску сверху и фиксируется крышкой. Инструментальная доска соединена с гидроцилиндром подпора с зазором для поджима в матрицедержатель и передвигается в направляющей, которая закреплена на станине.

Для модельной установки прижимное устройство было выполнено отдельно (рис. 1) и при консольном расположении валков закреплено на станине установки СЛИПП-2,5.

### Методика расчета усилий прижимного устройства матрицы к валкам

Неподвижная матрица находится в постоянном контакте с подвижными валками, образующими закрытый ящичный калибр прямоугольного сечения. Поэтому при реализации процесса СЛИПП особенно важно обеспечить конструктивно и технологически рациональный зазор на контакте рабочих валков и матрицы. С одной стороны, при минимальном зазоре интенсивно возрастает сила трения и увеличивается абразивный износ рабочего инструмента, а с другой – при увеличении зазора возможно появление заусенца с повышенной толщиной из деформируемого металла, что нарушает стабильность протекания непрерывного процесса обработки, ухудшает качество пресс-изделия и снижает выход годного [3]. Поэтому прижимное устройство матрицы к валкам должно обеспечивать в рабочем положении регламентируемую толщину заусенца из деформируемого металла на валках, т.е. усилие прижима должно удерживать матрицу в заданном положении и обеспечивать равномерное нагружение на рабочие валки (рис. 4).

Матрица в заданном положении (точка  $M$  на рис. 4) удерживается с помощью рычага  $ABCM$  прижимного устройства. Рычаг  $ABCM$  состоит из жестко закрепленных в точке  $C$  двух стержней  $MC$  и  $ABC$ , расположенных под прямым углом. Стержень  $ABC$  закреплен с помощью неподвижного шарнира в точке  $A$ . Усилие  $P_d$  от гидроцилиндра  $BD$  приложено в точке  $B$  и направлено

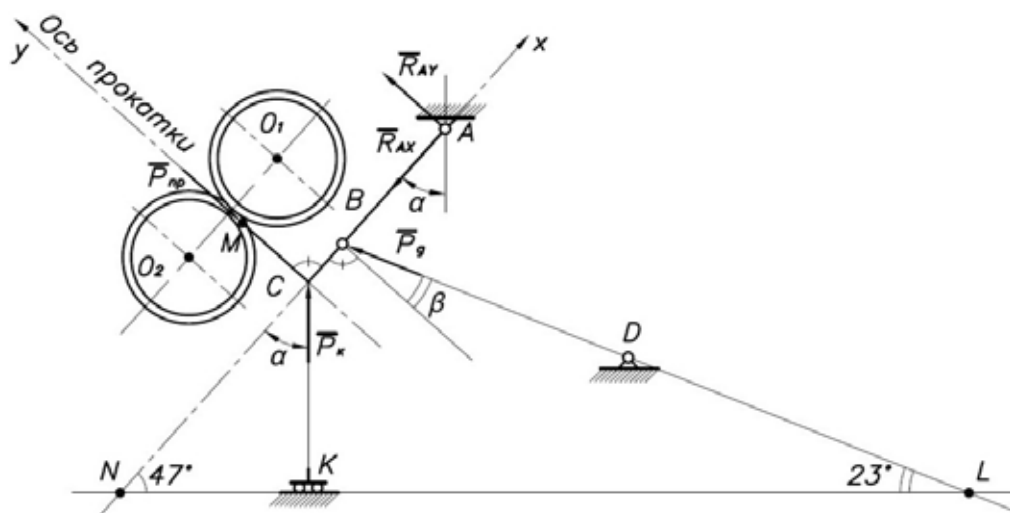


Рис. 4. Структурная схема к расчету усилия прижима

под углом  $\beta$  к нормали части рычага  $AC$ , поэтому больше действует (давит) на нижний валок с центром в точке  $O_2$ , что приводит в итоге к образованию заусенца большей толщины на поверхности верхнего валка с центром в точке  $O_1$ , разворачивает ось прессования через матрицу относительно оси прокатки через валки, что дестабилизирует процесс СЛИПП, приводя к его остановке. Одним из способов решения данной проблемы является создание компенсирующего усилия  $P_K$ , которое необходимо приложить к рычагу  $ABCM$  прижимного устройства в точке  $C$  с помощью гидроцилиндра, действующего вдоль прямой  $CK$ , который расположен по нормали к опорной поверхности и опирается на подвижный шарнир в точке  $K$ . При этом соотношение усилий  $P_D$  и  $P_K$  от гидроцилиндров должно быть таким, чтобы усилие прижима от рычага  $ABCM$  прижимного устройства удерживало бы матрицу в заданном положении и обеспечивало бы совпадение осей прессования и прокатки.

Для нахождения соотношения усилий  $P_D$  и  $P_K$  от гидроцилиндров в зависимости от известного усилия прижима матрицы  $P_M = P_{ПП}$  и реакции опоры неподвижного шарнира в точке  $A$  рассмотрим равновесие рычага  $ABCM$  прижимного устройства. Все силы находятся в одной плоскости, поэтому можно составить только три уравнения равновесия для данной системы сил, а число неизвестных величин –  $P_D$ ,  $P_K$ ,  $R_{AX}$  и  $R_{AY}$  равно четырем, т.е. задача является статически неопределимой. Поэтому примем условие, что проекция активных сил, действующих на нормаль к оси прокатки (ось  $x$ ), должна равняться нулю:

$$P_K \cos \alpha - P_D \sin \beta = 0; \text{ или } P_K = P_D \sin \beta / \cos \alpha . \quad (1)$$

Теперь задача стала статически определимой. Далее составляем уравнения равновесия для рычага  $ABCM$  прижимного устройства и определяем неизвестные величины:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_A(F_i) = P_{ПП} \cdot l_1 - P_K \cdot l_1 \sin \alpha - P_D \cdot l_2 \cos \beta = 0; \\ \sum_{i=1}^n F_{ix} = -R_{AX} + P_K \cos \alpha - P_D \sin \beta = 0; \\ \sum_{i=1}^n F_{iy} = R_{AY} - P_{ПП} + P_K \sin \alpha + P_D \cos \beta = 0; \end{cases} \quad (2)$$

где  $l_1 = AC$  и  $l_2 = AB$ ;  $l_2/l_1 = 0.74$ .

Откуда

$$P_D = \frac{P_{ПП} \cos \alpha}{\sin \alpha \sin \beta + l_2/l_1 \cos \alpha \cos \beta}; \quad (3)$$

$$P_K = \frac{P_{ПП} \sin \beta}{\sin \alpha \sin \beta + l_2/l_1 \cos \alpha \cos \beta}; \quad (4)$$

$$R_{AX} = 0; \quad R_{AY} = P_{ПП} - P_D \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha}. \quad (5)$$

Следует отметить, что рассмотренный случай в данной конструкции прижимного устройства возможен только в одном определенном положении матрицы относительно валков. При другом расположении матрицы (дальше или ближе точки  $M$ ) оси прессования прокатки не совпадают. Проанализируем данные случаи.

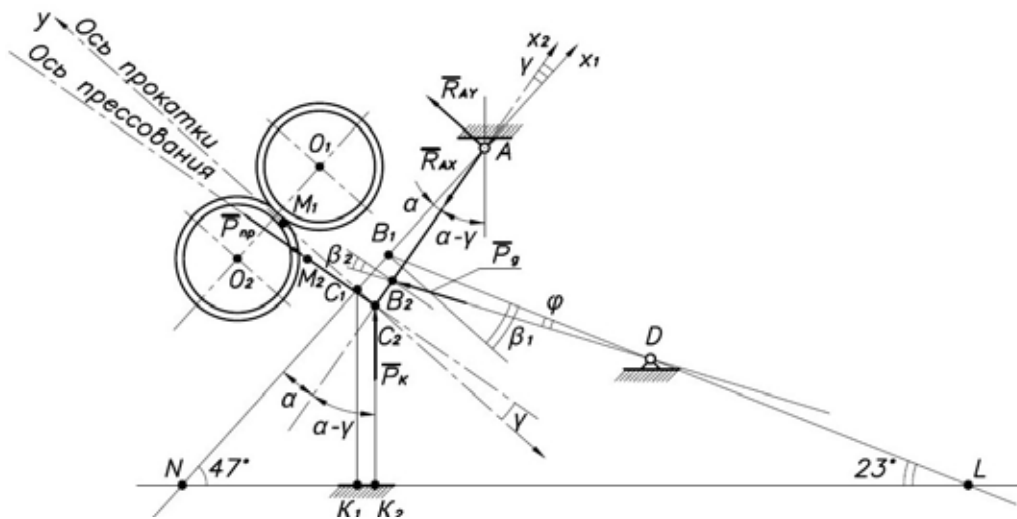


Рис. 5. Структурная схема опытно-промышленной установки СЛИПП при несовпадении осей прессования через матрицу и сортовой прокатки через валки (первый вариант расположения матрицы)

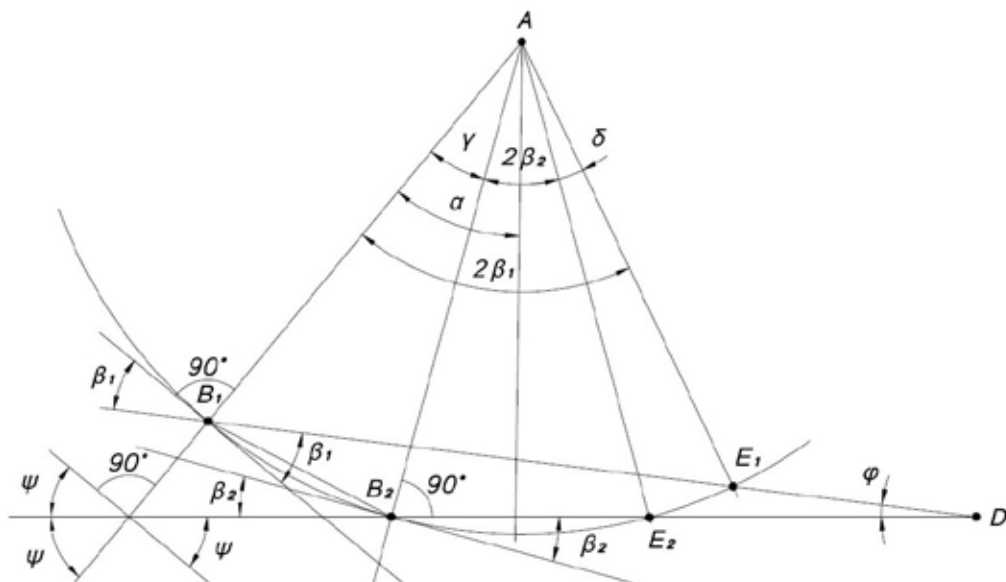


Рис. 6. Положения углов при несовпадении осей прессования через матрицу и сортовой прокатки через валки (первый вариант расположения матрицы)

Пусть матрица (первый вариант) располагается ближе к точке  $C$  рычага  $ABCM$  (в точке  $M_2$ ) от рассмотренного положения матрицы в точке  $M_1$  (рис. 5).

Тогда рычаг прижимного устройства займет положение  $AB_2C_2M_2$  и отклонится на угол  $\gamma$  от исходного положения рычага  $AB_1C_1M_1$ . Оси прессования через матрицу и сортовой прокатки через валки также будут расположены под этим углом  $\gamma$ . Подвижный шарнир из точки  $K_1$  переместится в точку  $K_2$ , а положения точек  $A$  и  $D$  останутся неизменными.

Условия задачи остаются прежними, но для ее решения необходимо вначале установить, как изменится угол  $\beta_2$ . Для этого рассмотрим схему, приведенную на рис. 6.

Учитывая, что углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  образованы соответствующей хордой и касательной, можно получить следующие геометрические соотношения:

$$\begin{aligned} \angle \beta_1 &= \frac{1}{2} \cup B_1 E_1 = \frac{1}{2} \cup (B_1 B_2 + B_2 E_2 + E_2 E_1); \\ \angle \beta_2 &= \frac{1}{2} \cup B_2 E_2; \quad \angle \delta = \frac{1}{2} \cup E_2 E_1; \quad \angle \gamma = \frac{1}{2} \cup B_1 B_2; \\ \angle \varphi &= \frac{1}{2} \cup (B_1 B_2 - E_2 E_1). \end{aligned} \quad (6)$$

Следует обратить внимание на то, что в данных равенствах фигурирует не длина дуг, а их угловая мера, совпадающая с величиной соответствующего центрального угла. Поэтому выражения (6) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{1}{2}(\gamma + 2\beta_2 + \delta) = \beta_2 + \frac{\gamma + \delta}{2} = \beta_2 + \gamma - \varphi; \\ \varphi &= \frac{\gamma - \delta}{2}; \quad \delta = \gamma - 2\varphi; \quad \psi = \beta_2 + \gamma. \end{aligned} \quad (7)$$

Далее составляем уравнения равновесия для рычага  $AB_2C_2M_2$  прижимного устройства, принимая во внимание условие, что проекция активных сил, действующих на нормаль к оси прокатки (ось  $x_i$ ) должна равняться нулю, а их проекция на ось прокатки соответствовать заданному усилию прижима матрицы  $P_M = P_{PP} \cos \gamma$ :

$$P_{PP} \sin \gamma + P_K \cos \alpha - P_D \sin \psi = 0; \quad (8)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_A(F_i) = P_{PP} \cdot l_1 - P_K \cdot l_1 \sin(\alpha - \gamma) - P_D \cdot l_2 \cos \beta_2 = 0; \\ \sum_{i=1}^n F_{ix_2} = -R_{AX} + P_K \cos(\alpha - \gamma) - P_D \sin \beta_2 = 0; \\ \sum_{i=1}^n m_{C_2}(F_i) = R_{AY} \cdot l_1 + P_D \cdot l_2 \cos \beta_2 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Отсюда найдем, что

$$P_K = \frac{P_D \sin \psi - P_{PP} \sin \gamma}{\cos \alpha}; \quad (10)$$

$$P_D = \frac{P_{PP} [\cos \alpha + \sin \gamma \sin(\alpha - \gamma)]}{\sin \psi \sin(\alpha - \gamma) + l_2/l_1 \cos \alpha \cos \beta_2}; \quad (11)$$

$$R_{AX} = P_K \cos(\alpha - \gamma) - P_D \sin \beta_2; \quad R_{AY} = -P_D \cdot l_2/l_1 \cos \beta_2. \quad (12)$$

Рассмотрим следующий случай (второй вариант расположения матрицы), когда матрица располагается дальше от точки  $C$  рычага  $ABCM$  (в точке  $M_2$ ) от рассмотренного положения матрицы в точке  $M_1$  (рис. 7).



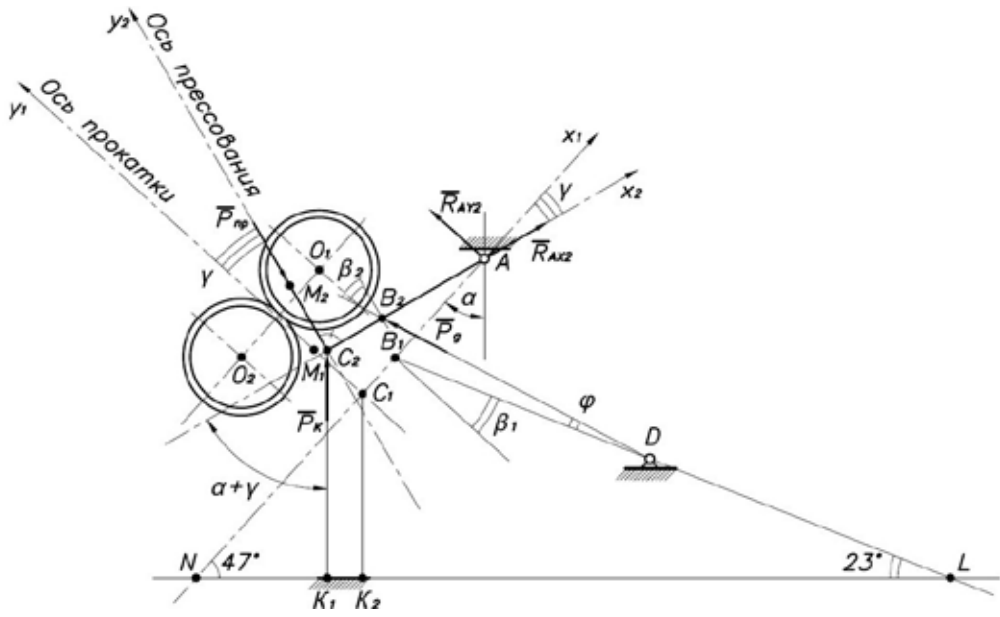


Рис. 7. Структурная схема опытно-промышленной установки СЛИПП при несовпадении осей прессования через матрицу и сортовой прокатки через валки (второй вариант расположения матрицы)

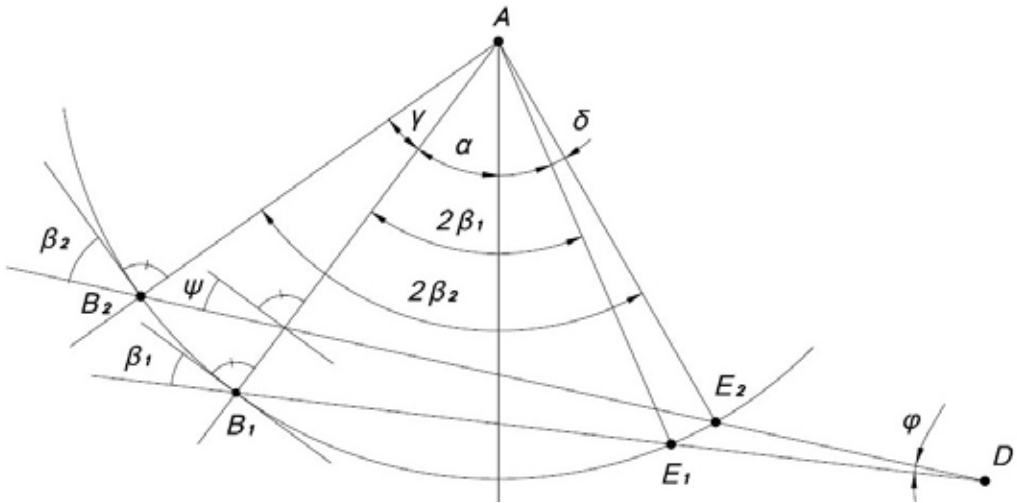


Рис. 8. Положения углов при несовпадении осей прессования через матрицу и сортовой прокатки через валки (второй вариант расположения матрицы)

Условия задачи остаются прежними и, так же как и в предыдущем случае, для ее решения вначале установим, как изменится угол  $\beta_2$ . Для этого рассмотрим схему, приведенную на рис. 8.

Из геометрических соотношений получим

$$\begin{aligned} \angle\beta_1 &= \frac{1}{2} \cup B_1E_1; \quad \angle\gamma = \frac{1}{2} \cup B_2B_1; \quad \angle\delta = \frac{1}{2} \cup E_1E_2; \\ \angle\beta_2 &= \frac{1}{2} \cup B_2E_2 = \frac{1}{2} \cup (B_2B_1 + B_1E_1 + E_1E_2); \\ \angle\varphi &= \frac{1}{2} \cup (B_2B_1 - E_1E_2). \end{aligned} \quad (13)$$

или в угловых мерах

$$\begin{aligned} \beta_2 &= \frac{1}{2}(\gamma + 2\beta_1 + \delta) = \beta_1 + \frac{\gamma + \delta}{2} = \beta_1 + \gamma - \varphi; \\ \varphi &= \frac{\gamma - \delta}{2}; \quad \delta = \gamma - 2\varphi; \quad \psi = \beta_2 - \gamma. \end{aligned} \quad (14)$$

Составляем уравнения равновесия для рычага  $AB_2C_2M_2$  прижимного устройства, принимая во внимание условие, что проекция активных сил, действующих на нормаль к оси прокатки (ось  $x_1$ ), должна равняться нулю, а их проекция на ось прокатки соответствовать заданному усилию прижима матрицы  $P_M = P_{PP} \cos \gamma$ :

$$-P_{PP} \sin \gamma + P_K \cos \alpha - P_D \sin \psi = 0; \quad (15)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n m_A(F_i) = P_{PP} \cdot l_1 - P_K \cdot l_1 \sin(\alpha + \gamma) - P_D \cdot l_2 \cos \beta_2 = 0; \\ \sum_{i=1}^n F_{ix_2} = R_{AX} + P_K \cos(\alpha + \gamma) - P_D \sin \beta_2 = 0; \\ \sum_{i=1}^n m_{C_2}(F_i) = R_{AY} \cdot l_1 + P_D \cdot l_2 \cos \beta_2 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Отсюда найдем, что

$$P_K = \frac{P_D \sin \psi + P_{PP} \sin \gamma}{\cos \alpha}; \quad (17)$$

$$P_D = \frac{P_{PP} [\cos \alpha - \sin \gamma \sin(\alpha + \gamma)]}{\sin \psi \sin(\alpha + \gamma) + l_2/l_1 \cos \alpha \cos \beta_2}; \quad (18)$$

$$R_{AX} = -P_K \cos(\alpha + \gamma) + P_D \sin \beta_2; \quad R_{AY} = -P_D \cdot l_2/l_1 \cos \beta_2. \quad (19)$$

Нетрудно убедиться, что при  $\gamma = 0$  полученные выражения (10)-(12) и (17)-(19) принимают один и тот же вид, что подтверждает правильность решения поставленной задачи.

При анализе силовых условий процесса СЛИПП по расчетным зависимостям в качестве исходных условий были приняты следующие конструктивные и технологические параметры,

Таблица 2. Силовые условия процесса СЛИПП из сплава алюминия с цирконием

№ варианта	Расчетные параметры силовых условий СЛИПП							
	$P_{ПРЕСС}$	$P_{ПР}$	$P_{Д}$	$P_{К}$	$R_{А}$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
	кН	кН	кН	кН	кН	град	град	град
без $P_{К}$	235	327	471	0	198	42	20	0
1	235	327	326	150	80	42	20	0
2	235	328	340	141	239	42	18	3
3	235	328	313	160	215	42	22	3

соответствующие конструктивным и технологическим параметрам опытно-промышленной испытаний установки СЛИПП-2,5:

- радиусы валков: по выступу  $R_1 = 236$  мм; по дну ручья  $R_2 = 192$  мм; по реборде  $R_3 = 230$  мм;
- высота: входа металла в валки (заготовки)  $h_0 = 40$  мм; калибра в наименьшем сечении  $h_1 = 20$  мм; матрицы в месте перекрытия валков  $h_M = 34$  мм;
- углы наклона гидроцилиндров  $СК$  и  $ВД$  соответственно –  $\alpha = 42^\circ$  и  $\beta = 20^\circ$ ;
- диаметр пресс-изделия из сплава алюминия с цирконием  $d_{ПР} = 9,5 \pm 0,5$  мм.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

### Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Применение компенсирующего усилия, приложенного к рычагу прижимного устройства матрицы к валкам для созданной конструкции опытно-промышленной установки СЛИПП-2,5 с помощью вертикального гидроцилиндра, позволяет исключить неравномерное силовое воздействие на рабочие валки во время ее работы и гарантирует регламентируемую толщину заусенца из деформируемого металла на валках.

2. Создание компенсирующего усилия в 1,38-1,50 раза снижает усилие прижима в наклонном гидроцилиндре прижимного устройства матрицы к валкам и почти в два раза реакцию опоры в шарнире рычага прижимного устройства, что существенно повышает конструктивную надежность установки.

3. Необходимое компенсирующее усилие примерно в 2,2 раза меньше усилия в наклонном гидроцилиндре прижимного устройства.

4. Несовпадение осей прокатки и прессования в установке СЛИПП-2,5 приводит к увеличению в 2,7-3,0 раза реакции опоры рычага прижимного устройства.

Таким образом, использование дополнительного компенсирующего устройства в созданной конструкции опытно-промышленной установки СЛИПП-2,5 способствует улучшению ее эксплуатационных характеристик.

### Список литературы

[1] Довженко Н.Н. Беляев С.В., Сидельников С.Б. и др. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2009. 256 с.

[2] Sidelnikov S.B. Baranov V.N., Lopatina E.S. etc. Study of effect of nickel and rare-earth metals on the structure and properties of cast and deformed semi-finished products made of aluminum alloys // Journal of Siberian Federal University. 2012. № 1. P. 19-27.

[3] Беляев, С.В., Сидельников С.Б., Довженко Н.Н. и др. Выбор оптимальных зазоров в калибре при совмещенной прокатке и прессовании // Журнал Сиб. федер. ун-та // Техника и технология. 2010. Т. 3 № 4. С. 411-421.

## Improvement of Construction of the Pilot Industrial Plant SLIPP-2,5

**Nikolay N. Dovzenko<sup>a</sup>, Sergey B. Sidelnikov<sup>a</sup>,  
Sergey V. Belyaev<sup>a</sup>, Sergey V. Soldatov<sup>b</sup>,  
Vadim M. Bepalov<sup>a</sup> and Victor V. Leonov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> Siberian Federal University,

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia

<sup>b</sup> LLC «RUSAL ETC»,

37/1 Pogranichnicov, Krasnoyarsk, 660111 Russia

---

*The application of compensating device for the improvement of construction of the pilot industrial plant SLIPP-2,5 presents in this article. The design procedure of the power-producing hold-down device of die to the rollers on the making of the stick from aluminum alloy with zirconium is presented.*

*Keywords: process of combine rolling-and extrusion, hold-down device of die to the rollers specific pressure, the design procedure of the power-producing hold-down.*

---