

Паспорт 11-61-84 на алюминиевый сплав марки 01570, 1984 г. **10.** Effect of Sc on Recrystallization of Aluminum and it's Alloys / T.D. Rostova, V.G. Davydov, V.I. Yelagin [and other] // Proc. of ICAA7/ - 2000. – Part 2. – P. 793-798. **11.** Особенности формирования структуры и свойств литейных Al-Mg-сплавов, легированных скандием / В.В. Черкасов, П.П. Побежимов, Л.П. Нефедова [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 6. – С. 30-32. **12.** Высокоскоростная сверхпластичность нанокристаллического алюминиевого сплава 01570 / В.Н. Перевезенцев, М.Ю. Щербань, М.Ю. Мурашкин [и др.] // Письма в «Журнал технической физики». – 2007. – Т. 33. - № 15. – С. 40-46. **13.** Автократова Е.В. Перспективный Al-Mg-Sc сплав для самолетостроения / Е.В. Автократова // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 1. – С. 182-183. **14.** Юнусова Н.Ф. Высокоскоростная сверхпластичность в алюминиевых сплавах 1420 и 1421, равноканальному угловому прессованию / Н.Ф. Юнусова, Р.К. Исламгалиев, Р.З. Валиев // Металлы. – 2004. – №2. – С. 21-28. **15.** Пат. 2246555 Россия, МПК С22F1/053. Способ получения сверхпластичного листа из высокопрочного алюминиевого сплава и изделие, полученное из него / И.Н. Фридляндер, О.Г. Сенаторова, В.В. Сидельников и др. – Заявл. 22.01.2004; Опубл. 20.02.2005.

## УДК 621.771

**ПЛЕСНЕЦОВ Ю.А.**, канд. техн. наук, зав. кафедрой «ОМД» НТУ «ХПИ»  
**ГОРОБЕЙ Н.Р.**, студентка, НТУ «ХПИ»  
**КОВОРОТНЫЙ Т.Л.**, ассистент, НТУ «ХПИ»

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ ПРОФИЛЕЙ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ОРЕБРЕНИЕМ**

С использованием метода конечных элементов выполнен анализ формоизменения металла и определены энергосиловые параметры прокатки периодических полосовых бичевых профилей. Анализ полученных теоретических зависимостей позволил установить, что с увеличением температуры деформации (от 950°C до 1150°C) энергосиловые параметры процесса снижаются до 50%, увеличение истинной деформации от 1,5 до 2,0 приводит к их возрастанию до 40%, для достижения требуемой высоты ребра (8 мм) необходимо создание истинной деформации пределах 1,5. Для этого не требуется применение повышенной жесткости.

З використанням метода кінцевих елементів виконано аналіз формозмінення металу та визначені енергосилові параметри прокатки періодичних смугових бичових профілів. Аналіз отриманих теоретичних залежностей дозволив встановити, що зі збільшенням температури деформації (від 950°C до 1150°C) енергосилові параметри процесу знижуються до 50%, збільшення істинної деформації від 1,5 до 2,0 призводить до їх зростання до 40%, для досягнення потрібної висоти ребра (8 мм) необхідно створення істинної деформації в межах 1,5. Для цього не потрібне використання підвищеної жорсткості.

Using method of finite elements the analysis of metal forming of periodic stripped whip roll forms was completed and their energy power parameters were defined. The analysis of gained theoretic dependencies allowed to determine that with growing the strain temperature (from 950°C to 1150°C) the energy power parameters of process fall down to 50%, and increase of true strain from 1,5 to 2,0 cause their growth up to 40%, to gain the required rib height (8 mm) it is needed to create the true strain near 1,5. Increased harshness is not required in this case.

Важнейшим узлом зерноуборочного комбайна является молотильный барабан, главная и основная деталь которого – бичевые профили (профили непосредственно участвующие в обмолоте зерновой массы). Бичевые профили представляют собой сложные периодические профили с поперечным односторонним оребрением, которое участвует в процессе обмолота зерновой массы, контактируя с ней путем ударного воздействия по обмолачиваемой массе.

**Цель работы** – исследование формоизменения при прокатке периодических профилей.

Для достижения цели в работе выполнен теоретический анализ течения металла в очаге деформации и получены зависимости для определения энергосиловых параметров прокатки полосовых бичевых профилей – периодических профилей с поперечным оребрением.

Для решения задачи применяем известный вариант метода конечных элементов [1, 2].

Задача имеет следующую физическую интерпретацию. Некоторое сечение подката до деформации покрыто квадратными ячейками. При возникновении деформации эти ячейки подвергаются искажению, как по форме, так и по размерам без разрывов и с сохранением объемов каждой ячейки. До деформации рассматриваемое сечение имеет единичную длину в направлении перпендикулярном плоскости сечения, а после деформации для двухмерных конечных элементов предполагается, что все удлинения в направлении, перпендикулярном плоскости деформированного сечения, одинаковы. Таким образом, все деформированные ячейки после деформации имеют одинаковую площадь не обязательно равную первоначальной. Необходимо определить координаты ячеек после деформации, предполагая, что суммарная работа деформации ячеек минимальна. При этом необходимо соблюдать условие на контакте сечения с внешними факторами, например, геометрическую форму контакта и инструмента при прокатке, условия трения и т.д. Данная методика разработана применительно к ориентированным по направлению прокатки ребрам и позволяет прогнозировать форму ребра после прокатки в заданном прокатном оборудовании и рассчитывать параметры требуемого оборудования для обеспечения технических требований готового профиля.

Задачу в обобщенном виде можно сформулировать следующим образом. Пусть имеется одно сечение, деформация которого зависит от деформации рассматриваемого сечения и расчет работы деформирования производится в зависимости от величины этой деформации. Требуется определить координаты ячеек после деформации исходя из предложения о минимизации суммарной работы деформации рассматриваемых ячеек и дополнительного сечения.

Математическая задача ставится следующим образом.

Составляется функция Лагранжа:

$$L = \Phi_1 + \lambda\Phi = \min, \quad (1)$$

Уравнение (1) решается методом покоординатного спуска путем вариации внутренних узлов ячейки и величины  $\lambda$ .

Объем каждой ячейки после деформации обозначим через  $V$ . Условия равенства объемов каждой ячейки величине  $V$  записывается в виде:

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \sum_{k=1}^{m_3} (V_{ijk} - V)^2 = \min, \quad (2)$$

где  $V_{ijk}$  – объем ячейки с номером  $ijk$  до деформации;  
 $m$  – число конечных элементов в очаге деформации.  
Условие минимума работы деформации имеет вид:

$$\Phi_2 = \sum_{ijk} \varepsilon_{ijk} \sigma_{ijk} \Delta X^3 + A(\varepsilon_{cp}) = \min, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{ijk}$  – интенсивность деформации ячейки с номером  $ijk$ ;  
 $\sigma_{ijk}$  – интенсивность напряжений в ячейках с номером  $ijk$ ;  
 $\Delta X$  – размер ячейки до деформации;  
 $\varepsilon_{cp}$  – средняя интенсивность деформаций;  
 $A(\varepsilon_{cp})$  – работа деформации, зависящая от деформации рассчитываемого сечения.

Интенсивность деформации определяется по формуле:

$$\varepsilon_{ijk} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left[ \left( \varepsilon_{x_{ijk}} - \varepsilon_{y_{ijk}} \right)^2 + \left( \varepsilon_{y_{ijk}} - \varepsilon_{z_{ijk}} \right)^2 + \left( \varepsilon_{z_{ijk}} - \varepsilon_{x_{ijk}} \right)^2 + \frac{3}{2} \left( \varepsilon_{xy_{ijk}}^2 + \varepsilon_{yz_{ijk}}^2 + \varepsilon_{zx_{ijk}}^2 \right) \right]}. \quad (4)$$

Интенсивность напряжений рассчитывается по эмпирическим формулам [3] и зависит от деформации, скорости деформации, температуры и химического состава материала ячейки.

Кроме условий (2) и (3) имеются граничные условия еще двух типов:

- на какой-то части границы деформированного сечения заданы координаты  $x_2, y_2, z_2$  деформированных ячеек;
- на какой-то части границы деформированного сечения заданы условия симметрии координат  $x_2, y_2, z_2$  деформированных ячеек.

Условия (2) и (3) противоречат друг другу. Это легко увидеть на примере прямоугольной области, имеющей  $m+n$  ячеек или  $(m+1)(n+1)$  точек сеточной области. Если продифференцировать каждое из условий (2) и (3) по  $x_{ijk}$  и  $y_{ijk}$ , то получим  $4mn$  уравнений относительно  $2mn$  неизвестных.

Таким образом, уравнения (2) и (3) с граничными условиями представляют собой типичную задачу на условный экстремум.

Уравнение (2) решается методом покоординатного спуска путем вариации координат внутренних узлов ячейки и величины  $\lambda$ .

Рассматриваемая задача является не стационарной, Однако приближенно можно принять, что все граничные ячейки линии BCDEFKMNQG вытягиваются на одну и ту же величину  $\mu$  (рис. 1).

Это допущение для большинства видов оребрения (угол между касательной к элементу оребрения и образующей валка отличен от нуля) обоснованно, так как в каждый момент времени в любом поперечном сечении очага деформации находятся различные участки элементов оребрения, расположенных вдоль образующей валка.

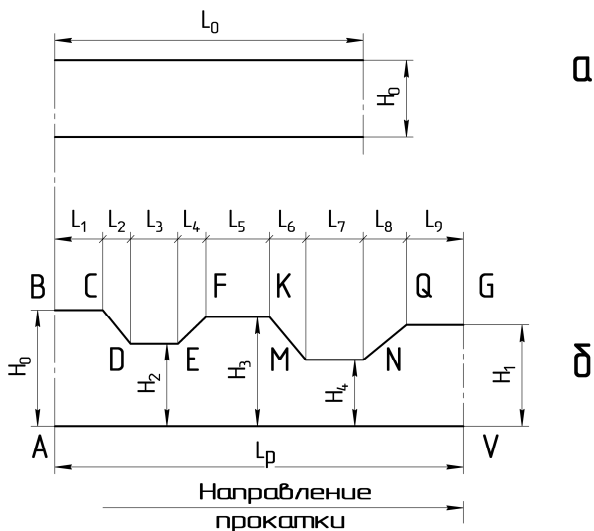


Рис. 1. Рассматриваемое продольное сечение до (а) и после (б) деформации

Для рассмотрения принимаем профиль, подобный представленному на рис. 1, который разбиваем на девять участков (рис. 2) с длинами  $L_1 \dots L_9$ . Варьируемые параметры –  $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$ .

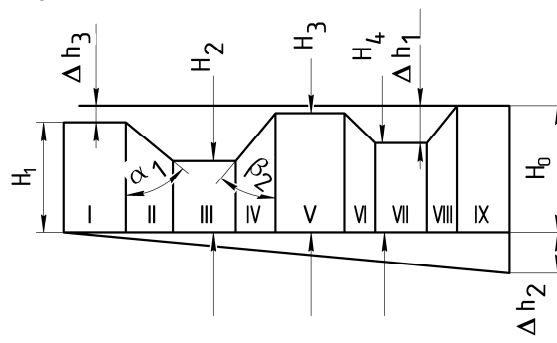


Рис. 2. Схема к расчету технологических параметров прокатки

Допущение о равенстве уширения всех конечных элементов снижает точность расчета, поэтому была использована уточненная модель бокового уширения профиля и утяжки ребра и функционал, имеющий вид:

$$\Phi = \sum_i \left[ A_i + C \left( \frac{F_{li}}{F_{oi}} - \frac{1}{\beta_i} \right)^2 \right] = \min, \quad (5)$$

где  $F_{oi}$  – площадь  $i$ -го конечного элемента до прокатки;

$F_{li}$  – площадь  $i$ -го конечного элемента после прокатки;

$\beta_i$  – коэффициент уширения  $i$ -го конечного элемента.

Работа деформации каждого конечного элемента рассчитывалась по известной формуле [3]:

$$A_i = \sigma_s \varepsilon V, \quad (6)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление деформации, зависящее от температуры, химического состава стали, степени и скорости деформации, рассчитываемое по формуле [3];

$\varepsilon$  – интенсивность деформации, рассчитываемая по формуле (4).

В разрезе показан симметричный элемент с двумя зубьями (рис. 1) в очаге деформации, по вертикальным линиям В и С принято условие симметрии, т.е. равенство нулю горизонтальных перемещений. Также принято нулевое перемещение металла в горизонтальном направлении по линии контакта с гладким валком, что моделирует условие скольжения.

Несмотря на стационарность задачи, по горизонтальным линиям зубчатого валка перемещения усредняли по всей длине очага деформации и за очаговой зоной по известному методу [2].

Составляющие интенсивности деформации для каждого элемента рассчитывали по формулам (рис. 3):

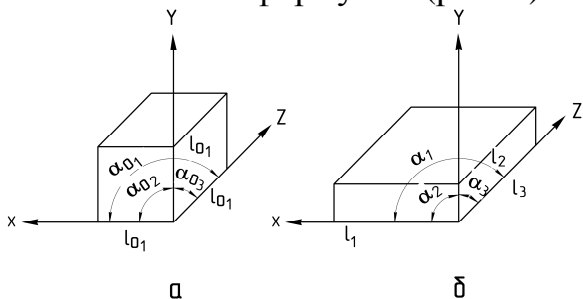


Рис. 3. Определение составляющих интенсивности деформаций конечного элемента:

а – конечный элемент до деформации;  
б – конечный элемент после деформации

III одинакова. Если обозначить длину первого участка через  $l_1$ , площадь его через  $F_1$ , длины второго и третьего участков через  $l_2$ , высоту их через  $h_0$ , уширение первого участка через  $\beta$ , длину всех трех участков до прокатки через  $l_0$ , то для определения  $l_2$  из закона сохранения получим:

$$l_0 h_0 = F_1 \beta + h_0 l_1 \frac{1+\beta}{2} + h_0 l_2, \quad (8)$$

откуда

$$l_1 = \frac{l_0 h_0 - F_1 \beta}{h_0 \left(1.5 + \frac{\beta}{2}\right)}, \quad (9)$$

Варьируя величиной  $\beta$  и величиной ребра, строим деформированную картину конечных элементов, согласно описанному алгоритму и получаем работу деформации  $A(\beta)$ , значение  $\beta$  и величины высоты ребра, соответствующее наименьшей  $A(\beta)$ , принимаем за истинной формоизменение.

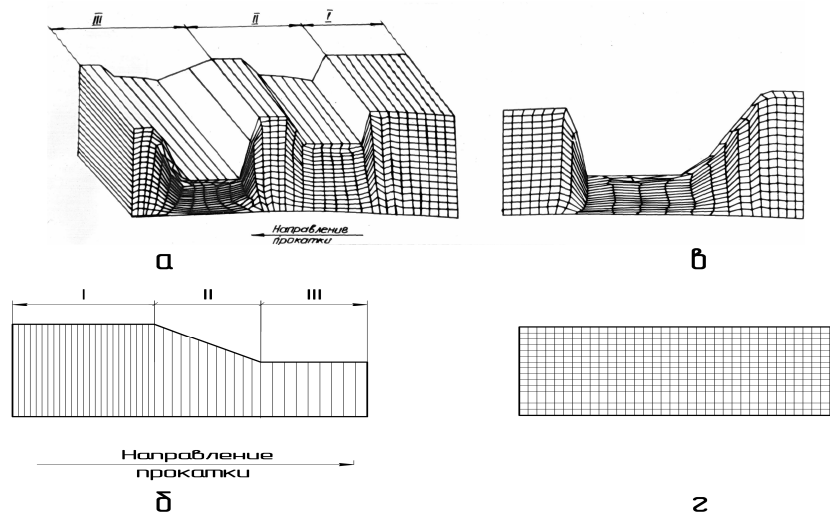


Рис. 4. Схема разбиения бичевого профиля на конечные элементы:  
а – аксонометрия после прокатки; б – вид сверху после прокатки;  
в – вид сбоку после прокатки; г – вид сбоку до прокатки.

При реализации приведенной постановки задачи на компьютере и, исходя из анализа известных систем основных программных модулей, (реализующих расчет деформированной картины и работы деформации для любых квазиобъемных задач обработки металлов давлением, граница которых состоит из прямых линий), в настоящей работе использованы следующие модули:

- расчет начальных внутренних и граничных координат деформированной сетки конечных элементов бичевого профиля;
- расчет координат недеформированной сетки конечных элементов полосового бичевого профиля;
- расчет площадей конечных элементов по заданной совокупности их номеров;
- расчет длины второго и третьего участков.

В качестве информационной базы в используемой программе принято разбиение области на четырехугольные блоки, которые автоматически разбиваются на четырехугольные конечные элементы. Блоки нумеруются произвольным образом. Взаимное расположение блоков характеризуется номерами левого, правого, нижнего и верхнего блоков.

После определения варьируемых параметров, усилие  $P$ , момент  $M$  и мощность  $N$  прокатки рассчитываются по формулам:

$$P = \frac{Ab}{\Delta h_{cp}} = \frac{\varepsilon \sigma v b}{\Delta h_{cp}}, \quad (10)$$

$$M = \frac{AR}{l_{\partial}}, \quad (11)$$

$$N = \frac{M}{R} v, \quad (12)$$

где  $v$  - скорость прокатки.

Для оперативного анализа деформированного состояния была использована типовая программа для вывода информации на монитор компьютера.

В используемой программе применен комплекс графических программ, разработанный в институте прикладной математики им. М.В. Келдыша. Особенностью примененной программы является то, что координаты деформированной картины выводятся на монитор. Вид деформированного состояния при прокатке полосовых бичевых профилей приведен на рис. 5.

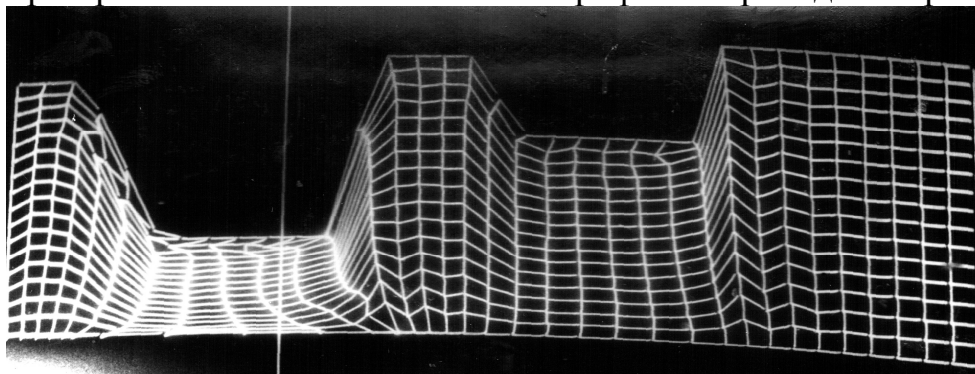


Рис. 5. Деформированное состояние металла при прокатке

Анализ деформированного состояния металла показал, что длина очага деформации в ходе прокатки изменяется, причем сама деформация начинается до

входа выделенного сечения в геометрический очаг деформации. Изменение длины очага деформации носит непрерывный характер – ее изменение обусловлено перемещением входящего в очаг деформации зуба рабочего инструмента в сторону выхода в интервале времени от начала контакта до вступления в контакт с металлом очередного зуба. Особенностью этого процесса является расположение зубьев под углом к оси прокатки. Что приводит к одновременному внедрению с началом внедрения одного зуба внедрению другого.

Имеет место резкая неравномерность деформации по длине и высоте полосы. Первая обусловлена последовательным внедрением в металл заготовки зубьев валков и образованием ребер на раскате. Другой особенностью рассматриваемого процесса является формирование вершин ребер не за счет обжатия, а за счет утяжки. Таким образом, можно сделать вывод о том, что металл в месте формирования ребер не достигает дна калибра. Этим объясняется и характер линейно аппроксимированных кривых, полученных в ходе расчета основных параметров прокатки полосовых бичевых профилей. Все зависимости носят линейно-пропорциональный характер, отсутствуют изломы линий, соответствующие полному заполнению металлом калибров на валках.

На основании выполненных теоретических исследований разработана методика расчета основных технологических параметров прокатки, которая предусматривает следующую последовательность операций:

- определение исходных данных для расчета (параметры оборудования, варианты калибровки, температурного режима, материала и т.д.);
- расчет выбранных параметров метода конечных элементов с выводом сеточной модели на монитор;
- анализ полученных результатов с точки зрения выбора оптимальных параметров процесса.

Разработанная методика позволяет рассчитать технологические и энергосиловые параметры прокатки.

По разработанной программе произведены расчеты зависимости высоты ребра и относительного уширения от величины истинной деформации и температуры. Полученные зависимости представлены на рис. 6 и рис. 7. Величина высоты ребра при увеличении истинной деформации изменяется прямо пропорционально. Изменение температуры с 950°C до 1150°C приводит к приращению высоты ребра в пределах 11%.

Изменение величины истинной деформации с 1,0 до 2,0 приводит к приращению высоты ребра с 6,8мм до 10,1мм. Однако, для достижения требуемой высоты ребра – 8мм необходимо создание истинной деформации в пределах ~ 1,5; что не требует применения клетей повышенной жесткости и может быть обеспечено использованием обычных клетей дуо 250.

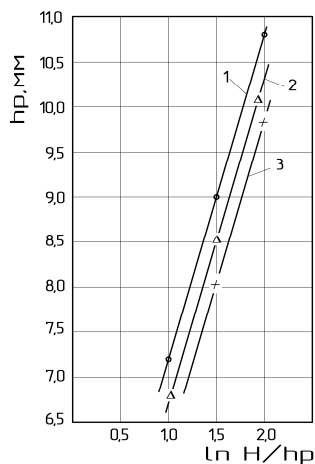


Рис. 6. Зависимость высоты ребра профиля от величины истинной деформации при различных температурах:  
1 –  $T=1150^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=1050^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=950^{\circ}\text{C}$

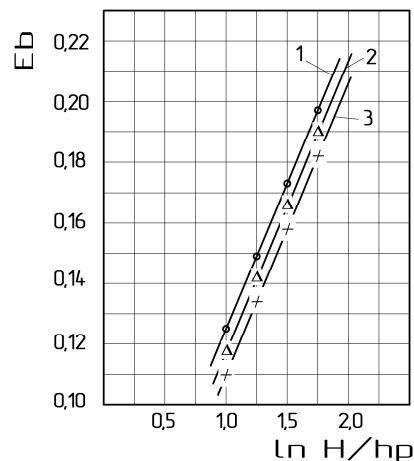


Рис. 7. Зависимость относительного уширения от величины истинной деформации при различных температурах:  
1 –  $T=1150^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=1050^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=950^{\circ}\text{C}$

Анализ зависимости относительного уширения профиля от величины истинной деформации при различных температурах (рис. 7) показал, что при увеличении величины истинной деформации относительное уширение растет пропорционально. С увеличением температуры этот рост значительно повышается. С ростом температуры от  $950^{\circ}\text{C}$  до  $1150^{\circ}\text{C}$  величина относительного уширения увеличивается, величина изменения относительного уширения (при постоянном значении истинной деформации) колеблется от 0,12 до 0,24. При величине истинной деформации, достаточной для обеспечения требуемой высоты ребра – 1,5, величина относительного уширения достигает значения в пределах 0,15...0,17.

По разработанной методике был произведен расчет энергосиловых параметров прокатки полосовых бичевых профилей. Полученные зависимости представлены на рис. 8 и рис. 9. На рис. 8 представлена зависимость усилия прокатки от величины истинной деформации при различных температурах.

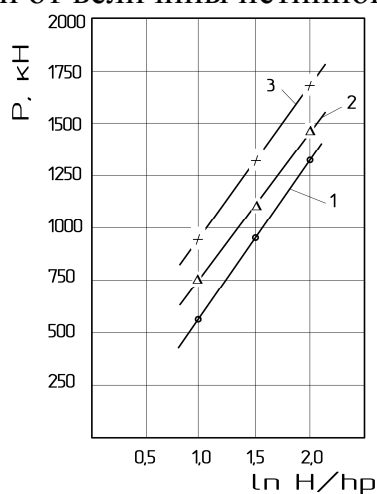


Рис. 8. Зависимость усилия прокатки от величины истинной деформации при различных температурах:  
1 –  $T=1150^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T=1050^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T=950^{\circ}\text{C}$

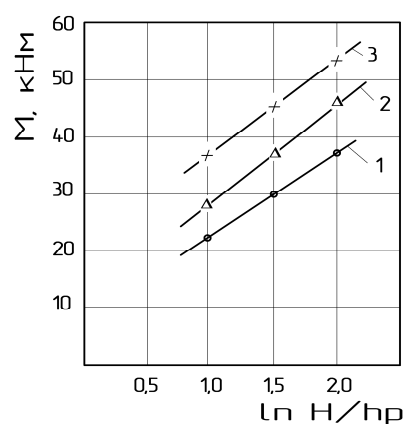


Рис. 9. Зависимость момента прокатки от величины истинной деформации при различных температурах:  
1.  $T=1150^{\circ}\text{C}$ ; 2.  $T=1050^{\circ}\text{C}$ ; 3.  $T=950^{\circ}\text{C}$



Использование показателя истинной деформации обусловлено большой деформацией при прокатке полосовых бичевых профилей. Анализ представленной зависимости (рис. 8) показал, что при температуре 1050°C увеличение истинной деформации с 1,0 до 1,5 приводит к возрастанию усилий прокатки на 37%. Снижение температуры при истинных деформациях 1,5 от 1150°C до 950°C приводит к возрастанию усилий прокатки на 44% и составит 1300 кН.

Аналогичные зависимости наблюдаются и у изменения момента прокатки от температуры прокатки и величины истинной деформации (см. рис. 9). так при температуре 950°C величина момента прокатки также будет максимальной и составит 45 кНм.

Полученные результаты теоретических исследований позволяют определить основные параметры технологии при прокатке полосовых бичевых профилей.

**Выводы:** 1. При решении задач формоизменения металла и определении энергосиловых параметров прокатки полосовых бичевых профилей использован метод конечных элементов. Использована известная методика теоретического расчета технологических параметров прокатки периодических профилей с поперечным ребрением в двухвалковом калибре, которая реализована в специальной прикладной программе. Она позволила оперативно анализировать деформированное состояние металла после прокатки по искажениям координатной сетки на мониторе.

2. Используемая известная методика расчета предусматривает следующую последовательность операций:

- определение исходных данных для расчета;
- расчет выбранных параметров методом конечных элементов с выдачей сеточной модели на монитор;
- анализ полученных результатов с точки зрения выбора оптимальных параметров процесса.

3. Анализ деформированного состояния металла показал, что длина очага деформации в ходе прокатки периодически изменяется. Это изменение носит непрерывный характер. Вершины ребер формируются без прямого обжатия при наличии утяжки. Металл в месте формирования ребер не достигает дна калибра, что объясняет характер линейно-аппроксимированных кривых носящий линейно-пропорциональный характер: отсутствуют изломы линий, соответствующие полному заполнению металлом калибров на валках.

4. Анализ полученных теоретических данных показал, что с увеличением температуры деформации (от 950°C до 1150°C) энергосиловые параметры процесса снижаются до 50%, и увеличение истинной деформации от 1,5 до 2,0 приводит к их возрастанию до 40%.

5. Анализ формоизменения подката в периодическом калибре показал, что для достижения требуемой высоты ребра(8 мм) необходимо создание истинной деформации пределах 1,5. Для этого не требуется применение повышенной жесткости.

**Список литературы:** 1. Определение критических деформаций полок двутавров по условиям устойчивости методом конечных элементов. – Н.Ф. Грицук, Е.Л. Белкин, И.Д. Лубский и др. – В сб.: Сортопрокатное производство, вып. 2. Определение параметров прокатки штрипсов с рифленой поверхностью./ В.Г. Кизиев, Е.Л. Белкин, Ю.Н.М. Диденко и др. – В сб.: Повышение эффективности производства и расширение сортамента горячекатаных профилей. Харьков, 1983, с. 32-40. 3. Андреюк П.В., Тюленев Г.Г. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации.- Сталь, 1972, №9, с. 825-828. 4. – Харьков: - УкрНИИМет, 1976, с. 18-22.

**УДК 621.771.2**

**КАПЛАНОВ В. И.**, доктор технических наук, проф., ПГТУ, г. Мариуполь  
**КОРЕНКО М.Г.**, аспирант, ПГТУ, г. Мариуполь.

**СТАРОСТА Н.В.**, зав. лабораториями кафедры Литейно – прокатных технологий, НМетАУ, г. Кривой Рог

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЮЩЕННЫХ ЛЕНТ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСОРТНЫХ СТАНОВ**

Рассмотрен процесс получения ленты методом горячей прокатки - плющения, с применением разгонных калибров в условиях мелкосортных станов. Предложена энергоэффективная технология производства лент на мелкосортном стане.

Ключевые слова: Плющенная лента, заготовка, расход металла, разгонный калибр, горячая прокатка, боковая кромка.

Розглянуто процес одержання стрічки методом гарячої прокатки -плющення, із застосуванням розгінних калібрів в умовах дрібносортового стану. Запропонована енергоефективна технологія виробництва стрічок на дрібносортовому стані.

Ключові слова: Плющена стрічка, заготовка, витрата металу, розгінний калібр, гаряча прокатка, бічна крайка.

The process of obtaining tapes by hot rolling - flattening with overlocking caliber in small-section mills. Proposed energy-efficient production technology for small-section mill feeds.

Keywords: Flattening tape, billet, consumption of metal, overlocking caliber, hot rolling, lateral edge

### **Введение**

Плющеную ленту применяют для изготовления различных деталей автотракторной и авиационной промышленности, в сельскохозяйственном машиностроении, приборостроении и других отраслях [1].

В настоящее время производство плющеной ленты организовано в сталепроволочных или прокатных цехах металлургических заводов и в заготовительных цехах машиностроительных заводов.

Технология изготовления плющеной ленты сложный и многостадийный процесс. Сортамент плющеной ленты весьма широкий. Плющением получают ленту толщиной в пределах от 0,01 мм до 10 мм и малой ширины (не превышает 30 мм) из различных марок сталей и сплавов (табл. 1).