

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ МНОГОРУЧНОГО КАЛИБРА НА РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ АРМАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ

П.Л. Шота, С.А. Мроз, Х.С. Дыя, А.А. Кавалек

*Целью проводимых исследований было определение разниц поля поперечного сечения разделенных жил и их влияние на размерную точность готовых ребристых прутков диаметром 16 мм. Анализ процесса прокатки проведен на основе числового моделирования выполненного с помощью программы Forge2007®. В работе представлены результаты прокатки из четырех последних прокатных клетей во время прокатки ребристого прутка диаметром 16 мм.*

*Ключевые слова:* прокатка-разделение, ребристые прутки, числовое моделирование, МКЭ

В течение последних лет на мировом рынке прокатных изделий можно заметить увеличивающийся спрос на круглые ребристые прутки, которые чаще всего используются для армирования бетона. Большой спрос на ребристые прутки является причиной стремления увеличить эффективность производства в уже существующих прокатных цехах. Строительство новых или модернизация уже существующих прокатных цехов влияет на увеличение производственной способности [1-4]. В настоящее время существуют два основных направления развития и модернизации прокатных цехов:

- прокатка ребристых прутков с многократным продольным разделением полосы,
- прокатка с большой скоростью вместе с системой быстрого приема прутков.

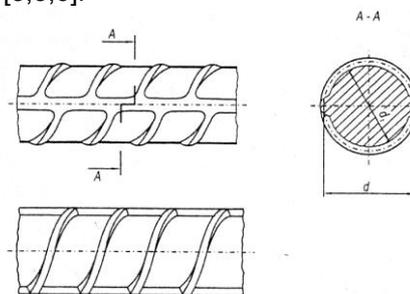
Благодаря применению прокатки ребристых прутков с многократным продольным разделением полосы можно увеличить производительную способность цеха и одновременно уменьшить производственные затраты, сохраняя высокое качество готового изделия [1, 2]. Многожильная прокатка это технология, имеющая много преимуществ, среди которых можно выделить:

- увеличение производительности станов,
- снижение единичного расхода энергии на деформирование металла в валках,
- возможность увеличения поля поверхности сечения шихты,
- меньшее количество пропусков,
- меньшая амортизация валков и прокатного оборудования.

Технология прокатки с продольным разделением полосы имеет, однако, ограниченное применение. Использование этой технологии является возможным во время произ-

водства ребристых прутков (рис.1). Недостатком технологии продольного разделения полосы является образование острых краев, которые появляются во время разрыва перемычки соединяющей отдельные жилы. Поэтому эта технология не используется для прокатки гладких прутков, поверхность которых должна быть гладкой [3].

Калибровка ребристых прутков с продольным разделением полосы основывается на использовании специальных разделяющих калибров на последнем этапе прокатки. Использование технологии продольного разделения полосы связано с необходимостью использования специальных пропусков и направляющих полосы с целью подготовки, формовки и продольного разделения полосы на отдельные полосы. Затем разделенная многожильная полоса на данной форме прокатывается в отдельных жилах (двух, трех, четырех и даже пяти) на готовые ребристые прутки. Примером прокатного стана, в котором применяется технология продольного разделения полосы, может быть непрерывный прокатный стан D350 показанный на рисунке 2 [3,5,6].



a)

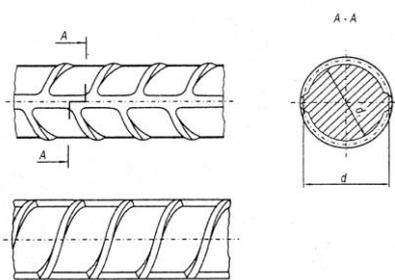


Рисунок 1 - Пример ребристых прутков с продольным ребром с разным расположением поперечных ребер: а) - расположение с одним скосом, б) - расположение с двумя скосами

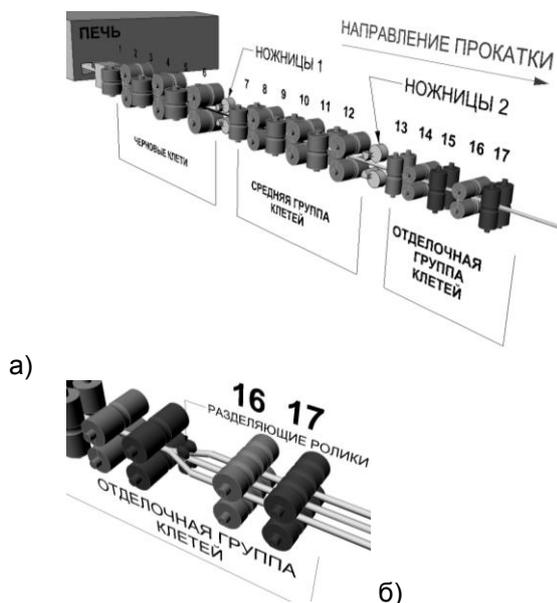


Рисунок 2 - Схема непрерывного прокатного стана D350: а) – схема прокатной линии, б) – ролики, разделяющие полосу на три жилы

Технология многожильной прокатки использует соединение деформации с разделением. На первом этапе наступает формирование из однолитого продукта нескольких профилей в многожильных калибрах, которые соединены между собой «перемычкой». Затем полученные профили разделяются на специальных разделяющих роликах (рис. 2б).

Многожильная прокатка отличается от стандартной технологии продольной прокатки меньшим расходом энергии. Во время разделения в калибрах работа деформации заменяется работой резки, отсюда энергосиловые параметры прокатки ниже [3].

Для прокатки ребристых прутков диаметром 16 мм на показанной на рис. 2 прокатной линии использовались калибры:

- ящичные калибры – прокатная клеть 1,2,

- калибр овальный с двумя радиусами – прокатная клеть 3,
- калибры в системе круг-овал – прокатная клеть 4-9,
- плоская бочка – ребровой калибр – клеть 10-13,
- калибр начально разделяющий – клеть 14,
- калибр разделяющий – клеть 15,
- калибр овальный плоский – клеть 16,
- калибр готовый ребристый диаметром 16 мм – клеть 17.

Прокатка ребристых прутков диаметром 16 мм по трехжильной технологии связана с разделением полосы на три отдельные жилы после 15 клетки. Формирование полосы перед разделением происходит в разделяющих калибрах таким образом, чтобы отдельные жилы имели одинаковые поля поперечного сечения. Подбор формы разделяющего калибра очень трудный из-за изменения распределения деформаций и напряжений, а также скорости течения металла на поперечном сечении полосы в зоне деформации.

Целью проводимых исследований было определение разниц поля поперечного сечения разделенных жил и их влияние на размерную точность готовых ребристых прутков диаметром 16 мм. Анализ процесса прокатки ребристых прутков диаметром 16 мм в технологии трехжильной был проведен для непрерывного прокатного стана одного из польских металлургических заводов. Форма калибров была взята из технологической инструкции прокатного стана. Анализ процесса прокатки проведен на основе числового моделирования выполненного с помощью программы Forge2007® [7]. В работе представлены результаты прокатки из четырех последних прокатных клетей во время прокатки ребристого прутка диаметром 16 мм.

#### Числовое моделирование

Правильное определение способа деформации в разделяющих калибрах, а также формы полосы после разделяющих калибров требовало проведения числового моделирования прокатываемой полосы от первого до последнего пропуска с учетом обнижения температуры между клетями. Числовое моделирование процесса прокатки ребристых прутков проводилось с помощью компьютерной программы Forge2007®, которая для расчетов использует метод конечных элементов. Термомеханические симуляции процесса прокатки ребристых прутков проводились с помощью лепкопластичной модели тела, для

# ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ МНОГОРУЧНОГО КАЛИБРА НА РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ АРМАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ

трехосевого стана деформации, деформированный материал описан законом Нортона-Хоффа [7,8]. Свойства стали 18G2A (сталь, из которой изготавливаются ребристые прутки) в компьютерных симуляциях была определена с помощью функции, определяющей пластикационное напряжение в зависимости от температуры, деформации и скорости деформации.

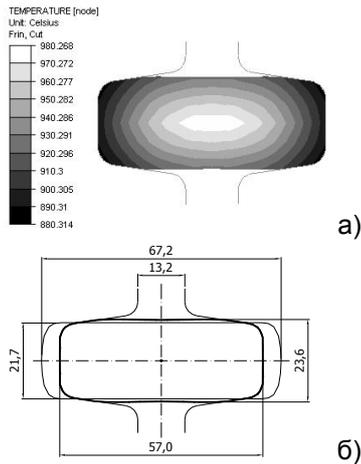


Рисунок 3 - Полоса после прокатки в клетке 13: а) распределение температуры полосы на поперечном сечении после клетки 13, б) – форма и размеры полосы после клетки 13

Для исследований был принят следующий коэффициент теплообмена: с валками  $3000 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{мм}^2)$ , с воздухом  $10 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{мм}^2)$ . Эти данные были взяты из базы данных компьютерной программы Forge2007®. Кроме того, для симуляции были приняты следующие начальные параметры: радиус валков 350 мм, распределение температуры в прокатываемой полосе было принято согласно с рис. 3а, скорость прокатки в последней клетке составляла 10,5 м/с, коэффициент и фактор трения был определен соответственно 0,35 и 0,7. Форма полосы перед клетью 14 показана на рис. 3б.

Для анализа деформации в четырех последних пропусках использовались калибры, представленные на рис. 4. На основании конструктивных рисунков калибров (рис. 4) разработано компьютерные модели валков, которые затем преобразовано в модели конечных элементов.

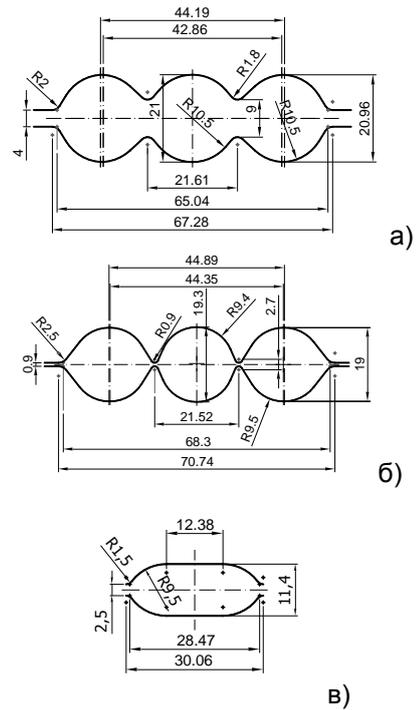


Рисунок 4 - Калибры, использованные для прокатки ребристых прутков диаметром 16 мм в трехжильной технологии: а) – калибр начально разделяющий (клеть 14), б) - калибр разделяющий (клеть 15), в) – калибр овальный плоский (клеть 16)

## Результаты числового моделирования

В работе проведен теоретический анализ результатов прокатки круглого ребристого прутка диаметром 16 мм в четырех последних клетях (14-17) с применением продольного разделения полосы. В результате проведенных числовых расчетов получена форма полосы после четырех остатних пропусков. На рис. 4 представлено заполнение калибров: начально разделительного и калибра разделительного.

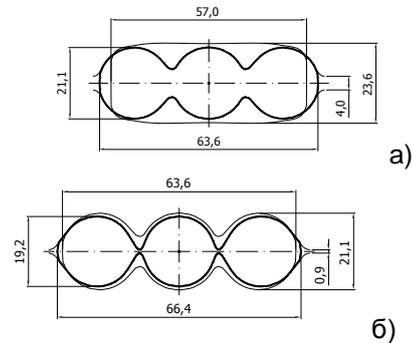


Рисунок 5 - Форма и размеры полосы после прокатки в калибре: а) – начально разделяющим; ( $A_{\text{внеш}}=347,0 \text{ мм}^2$ ,  $A_{\text{внутр}}=359,6 \text{ мм}^2$ ,  $\lambda=1,22$ ), б) – разделяющим ( $A_{\text{внеш}}=308,1 \text{ мм}^2$ ,  $A_{\text{внутр}}=295,5 \text{ мм}^2$ ,  $\lambda=1,16$ )

На основании результатов числового моделирования (рис. 5) доказано, что заполнение разделяющих калибров было правильным. После начального формирования полосы в калибре начально разделяющим, полоса была потом прокатана в калибре разделяющим, заданием которого было придание окончательной формы отдельным жилам, а также уменьшение толщины перемычки, соединяющей жилы. Таким образом сформированная полоса, после клети 15 была разделена в арматурных ящиках с помощью неведомых разделительных роликов. Разделенные жилы затем были прокатаны в овальном плоском калибре и круглым ребристым калибре. В описанных симуляциях прокатки процесс разделения не был моделирован, а только разделена полоса после 15 клети на две отдельные жилы: внешнюю и серединную. Было предположено, что кромочные жилы симметричны.

Полученные две внешние жилы и серединную жилу покатывались в клетях 16 и 17 на готовый ребристый пруток диаметром 16 мм. Результаты числового моделирования представлены на рис.6.

На основании полученных результатов числового моделирования прокатываемого ребристого прутка диаметром 16 мм в клетях 16 и 17 доказано, что как овальный калибр, так и круглый ребристый калибр были правильно заполнены во время прокатки внешней и серединной жилы. В результате разделения полосы на три жилы ширина овалов отличалась на 0,6 мм. Поле поверхности сечения внешнего овала было на 6 мм<sup>2</sup> больше. Во время прокатки в калибре круглом ребристым, разница поля поперечного сечения готового прутка уменьшилась до 2,4 мм<sup>2</sup>. Небольшая разница в полях сечения овальной полосы повлияла на ширину ребристых прутков. Пруток, прокатанный из внешней жилы был на 0,3 мм шире по сравнению с шириной прутка, прокатанного из серединной жилы. Кроме того, прутки полученные из внешней жилы отличались разной шириной продольного ребра. Ширина ребра со стороны свободно расширяющейся в разделительном калибре была меньше на 0,3 мм по сравнению с ребром, полученным со стороны перемычки в полосе после разделительного калибра. Разницы ширины продольных ребер следуют из неравномерного распределения температур на поперечном сечении плоского овала. Распределение температуры на поперечном сечении полосы в разделяющем ка-

либре, плоском овальном и круглом ребристым показано на рис.8.

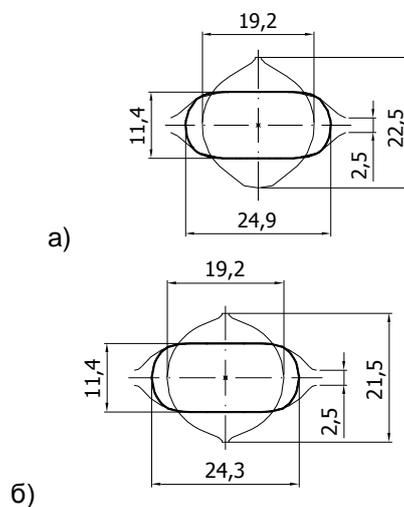


Рисунок 6 - Форма и размеры полосы после прокатки в овальном плоском калибре:

а) – овал прокатываемый из внешней жилы ( $A=258,5 \text{ мм}^2$ ,  $\lambda=1,19$ ), б) – овал прокатываемый из серединной жилы ( $A=252,2 \text{ мм}^2$ ,  $\lambda=1,17$ )

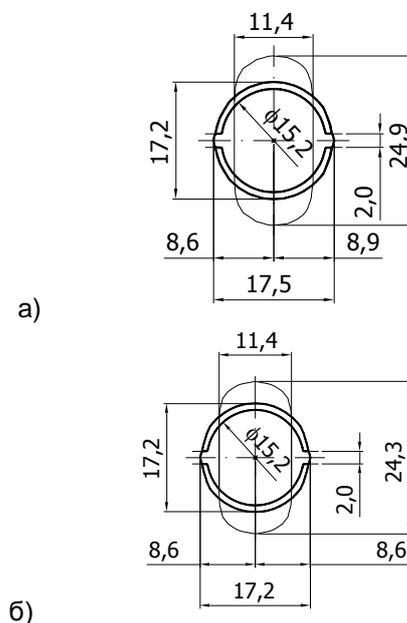


Рисунок 7 - Форма и размер готового ребристого прутка диаметром 16 мм: а) – прокатанного из внешней жилы ( $A=201,2 \text{ мм}^2$ ,  $\lambda=1,28$ ), б) – прокатанного из серединной жилы ( $A=198,8 \text{ мм}^2$ ,  $\lambda=1,27$ )

## ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ МНОГОРУЧНОГО КАЛИБРА НА РАЗМЕРНУЮ ТОЧНОСТЬ АРМАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ

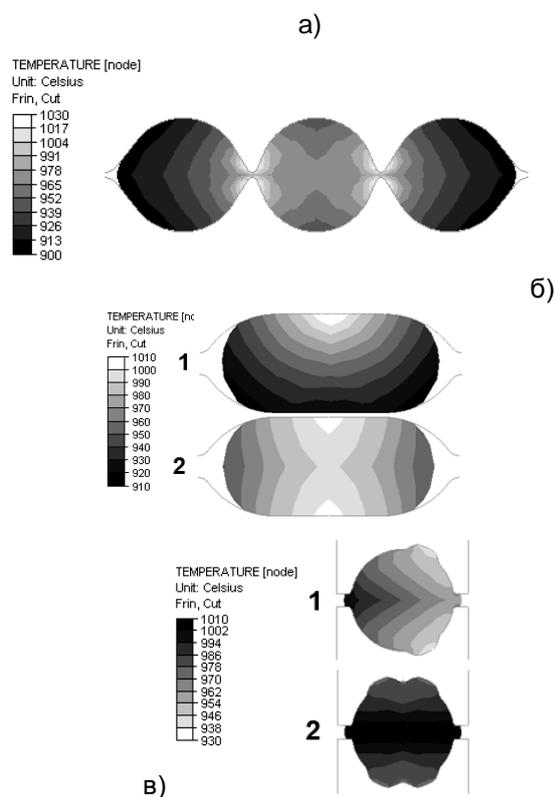


Рисунок 8 - Распределение температуры на поперечном сечении полосы: а) – разделяющий калибр клеть 15, б) – овальный плоский калибр клеть 16, в) – калибр круглый ребристый клеть 17, 1 – жила внешняя, 2 – жила срединная

На основании представленных распределений температуры можно заметить значительные различия в величинах температуры между внешней и срединной жилами. В случае прокатки ребристого прутка из срединной жилы, распределение температуры не имело большого значения, так как оно симметрично. В случае прокатки прутка из внешней жилы распределение температуры несимметрично и имеет большое значение на направление деформации. Более высокая температура влечет за собой меньший упор пластического течения и поэтому продольное ребро является более широким.

### Итоги

Во время прокатки ребристых прутков в трехжильной технологии появляются неравномерности распределения температуры на поперечном сечении полосы, которые влияют на неравномерность деформации, особенно во время прокатки внешних жил. Такие условия влияют на размерную точность ребристых прутков. Полученные ребристые прутки в числовом моделировании отличались пра-

вильными размерами, которые местились в границах допуска размера, определенных польским стандартом. Разницы в размере, появляющиеся в отдельных ребристых прутках в значительной степени уменьшают возможности прокатки в границах допуска размера (положительного или отрицательного). Разницы размеров прутков могут увеличиваться вместе со временем эксплуатации разделяющих калибров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Danchenko V., Dyja H., Lesik L., Mashkin L., Milenin A.: *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*, Politechnika Częstochowska, Prace Dydaktyczne Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria: Metalurgia Nr 28, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002, s. 326-328, 417-418.
2. Dyja H., Mróz S.: *Modelowanie i optymalizacja technologii walcowania prętów okrągłych, żebrowanych z wzdłużnym rozdzieleniem pasma*, Naukovi visti, Suchasti problemy metalurgi, Tom 8, Plastichna deformacija metaliv, Dniepropietrovsk 2005, s. 271-278.
3. Mróz S., *Proces walcowania prętów z wzdłużnym rozdzieleniem pasma*, Seria Monografia nr 183, Częstochowa 2008.
4. Grattan E.: *The multi – slit rolling process*, Ashlow Guides, 1997.
5. Michałowski M., Turczyn S., Nowakowski A.: *Analiza płynięcia metalu w wykrojach rozcinających stosowanych do walcowania prętów żebrowanych*, Hutnik – Wiadomości Hutnicze, nr 8-9, 2002, s. 342-345.
6. Morgardshammar Guide Systems. Slit rolling, 1998.
7. Forge3 Reference Guide, Realese 6.2, Transvalor S.A. November 2002.
8. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, *Finite Element Method*, Fifth Edition, Butterworth–Heinemann, Woburn, (2000).
9. Grosman F., Hadasik E.: *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*, Gliwice, 2005.

**Шота П.Л., к.т.н.,**  
**Мроз С.А., д.т.н.,**  
**Дья Х.С., профессор,**  
**Кавалек А.А., д.т.н.-**  
 Политехнический Институт, г. Ченстохова, Польша, mroz@wip.pcz.pl