

УДК 621.771

*А.А. Уманский<sup>1</sup>, В.Н. Кадыков<sup>1</sup>, Ю.А. Мартьянов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

<sup>2</sup> ОАО ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ В СОРТОВЫХ КАЛИБРАХ

**Аннотация.** С использованием специализированного программного комплекса DEFORM 3D проведено исследование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в сортовых калибрах простой формы. Применительно к условиям прокатки в ящичных, ромбических и овальных калибрах установлена взаимосвязь между напряженно-деформированным состоянием металла в объеме деформируемой заготовки и течением поверхностных слоев металла. С использованием полученных данных разработана новая калибровка валков мелко-сортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», внедрение которой позволило улучшить качество поверхности сортового проката.

**Ключевые слова:** калибры прокатных валков, деформация, заготовка, поверхностные дефекты.

*A.A. Umanskiĭ<sup>1</sup>, V.N. Kadykov<sup>1</sup>, Yu.A. Mart'yanov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University

<sup>2</sup> OAO EVRAZ - West Siberian Steel Corporation

## MATHEMATICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE METAL ROLLING IN BAR CALIBERS

**Abstract.** With the use of specialized software DEFORM 3D the stress-strain state of the metal rolling in a simple form of high-quality caliber has been investigated. As applied to rolling conditions in box, rhombus and oval calibers it has been found interconnection between the stress-strain state of the metal in the volume of the deformed workpiece and the passage of the surface layers of the metal. With the use of the data a new calibration of light-section mill rolls 250-2 of JCS "Evraz ZSMK" has been developed, the implementation of which has improved the quality of the surface of the rolled section.

**Keywords:** gages mill rolls, deformation, harvesting, surface defects.

*E-MAIL:* umanskiĭ@bk.ru

Исследование напряженно-деформированного состояния металла в процессе прокатки является одной из основных задач при проектировании калибровок валков. Неблагоприятная схема напряженно-деформированного состояния повышает вероятность образования дефектов металлопроката в процессе деформации и в значительной степени препятствует выкатываемости дефектов, уже имеющих на поверхности исходных заготовок.

В настоящее время для математического моделирования состояния металла в процессе прокатки широкое распространение получил специализированный инженерный программный комплекс DEFORM 3D. Существует опыт использования программы DEFORM 3D для анализа процессов деформации металла в сортовых [1] и универсальных [2] калибрах, а также прокатки на листовых станах [3, 4].

В основе программного комплекса DEFORM 3D использован метод конечных элементов, одной из основных задач которого является построение сетки конечного элемента. Автоматический сеточный генератор DEFORM 3D строит оптимизированную конечно-элементную сетку, сгущая ее в наиболее критичных зонах,

что повышает наглядность представления напряженно-деформированного состояния металла при прокатке.

С применением этого программного комплекса проведено моделирование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке заготовок различной формы в сортовых калибрах. Моделировали деформацию квадратной заготовки в ящичном, ромбическом и овальном калибрах. Выбор формы поперечного сечения заготовки и формы калибров обусловлен их наибольшим распространением на сортовых прокатных станах. Размер квадратной заготовки составил 30×30×200 мм. Размеры калибров при прокатке со степенью деформации 25 % выбирали, исходя из степени заполнения калибров 97 %. Геометрические размеры калибров, использованные при моделировании процесса сортовой прокатки, приведены ниже:

Форма калибра	$h_k$ , мм	$B_k$ , мм	$b_k$ , мм	$S$ , мм
Ящичный	24	33	30	2
Ромбический	33	46	–	2
Овальный	25	45	–	2

Примечание.  $h_k$  и  $B_k$  – общая высота и ширина калибра;  $b_k$  – ширина по дну калибра;  $S$  – зазор между валками.

Следует отметить, что геометрические параметры исходной заготовки и калибров соответствовали параметрам ранее проведенных лабораторных экспериментов по определению выкатываемости поверхностных дефектов [5]. Соблюдение условия геометрического подобия позволило обеспечить дополнительную воспроизводимость результатов.

При расчете в программном комплексе DEFORM 3D показателем, характеризующим напряженно-деформированное состояние металла, является критерий Кокрофта-Лэтэма, определяемый по формуле

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\bar{\varepsilon}$  – накопленная пластическая деформация;  $d\bar{\varepsilon}$  – приращение накопленной деформации;  $\sigma^*$  – максимальное главное растягивающее напряжение;  $\bar{\sigma}$  – интенсивность напряжений.

Критерий Кокрофта-Лэтэма характеризует степень использования запаса пластичности и, таким образом, является показателем вероятности образования и развития дефектов в процессе деформации.

Моделирование проводили для заготовки из низкоуглеродистой стали, содержащей 0,09 % С, температуру прокатки принимали 1150 °С, коэффициент трения 0,2. Использовали вязкоупругопластическую модель Джонсона-Кука, в которой предел текучести определяется по формуле

$$\sigma_T = \left( \sigma_{T0} + A\varepsilon^n \right) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 + \left( \frac{T - T_0}{T_{пл} - T_0} \right)^m \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{T0}$  – предел текучести при комнатной температуре;  $A$  – чувствительность к деформации;  $\varepsilon$  – эффективная пластическая деформация;  $n$  – параметр, отвечающий за влияние деформационного упрочнения;  $C$  – чувствительность к скорости деформации;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость изменения эффективной пластической деформации;  $\dot{\varepsilon}_0$  – референсная скорость деформации;  $T$  – температура заготовки;  $T_0$  – референсная температура;  $T_{пл}$  – температура плавления металла;  $m$  – параметр, описывающий температурное разупрочнение.

Применительно к вышеуказанной низкоуглеродистой стали значения параметров модели составили:  $\sigma_{T0} = 50,785$  МПа,  $A = 39,903$ ,  $C = 0,022$ ,  $D = 1$ ,  $n = 0,36$ ,  $m = 1$ .

Полученные данные о распределении критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската (рис. 1) позволяют констатировать, что независимо от формы калибра (ящичный, ромбический или овальный) наиболее неблагоприятная схема напряженно-деформированного состояния металла создается в поверхностных слоях заготовки в центральной зоне калибра. На гранях заготовки при прокатке в калибрах создаются менее благо-

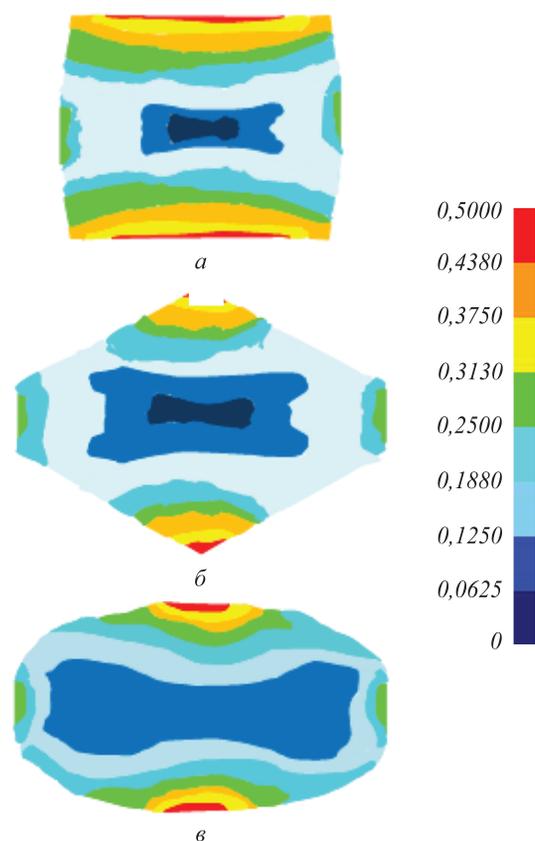


Рис. 1. Зависимость распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската от формы калибра при прокатке квадратной заготовки в ящичном (а), ромбическом (б) и овальном (в) калибрах

приятные условия для выработки поверхностных дефектов по сравнению с дефектами, расположенными на ребрах заготовки. По результатам лабораторных экспериментов дефекты на гранях заготовки вырабатываются на 11 % менее интенсивно по сравнению с дефектами на ребрах заготовки [5].

Наибольшие значения степени использования запаса пластичности как в приповерхностных слоях, так и в среднем по сечению раската получены для случая прокатки квадратной заготовки в овальном калибре. Степень использования запаса пластичности для различной формы калибра при прокатке квадратной заготовки приведены ниже:

Форма поперечного сечения исходного подката	Форма калибра	Степень использования запаса пластичности	
		максимальная	средняя по сечению
Квадрат	Ромбический	0,39	0,10
Квадрат	Ящичный	0,42	0,12
Квадрат	Овальный	0,45	0,13

Данный факт говорит о наихудших условиях выработки поверхностных дефектов, что согласуется с результатами лабораторных экспериментов [5].

Наиболее благоприятная схема напряженно-деформированного состояния металла имеет место при деформации квадратной заготовки в ромбическом калибре. Можно сделать вывод, что схема напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в значительной степени определяется подобием формы исходной заготовки и калибра, в котором происходит ее деформация. Наиболее благоприятная схема напряженно-деформированного состояния металла создается при высокой степени подобия формы заготовки и калибра.

С целью подтверждения сделанного вывода дополнительно смоделировали деформацию подката овального сечения в овальном калибре, размеры которого соответствовали размерам калибра в предыдущем эксперименте. Размеры исходного подката выбирали из условия получения степени деформации при прокатке 25 %. Полученные результаты подтвердили правильность вывода о взаимосвязи степени использования запаса пластичности с подобием формы исходной заготовки и калибра. Значения критерия Кокрофта-Лэтэма при использовании подката овального сечения значительно ниже, чем при прокатке квадратной заготовки (рис. 2): в среднем по сечению значение критерия Кокрофта-Лэтэма меньше на 0,09 (0,36 против 0,45), а максимальное значение меньше на 0,05 (0,08 против 0,13).

С целью более полного изучения механизмов создания напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в калибрах разной формы смоделировали течение металла в различных зонах по ширине калибров с помощью точек, нанесенных на верхнюю грань исходной заготовки. Всего для анализа выбрано 11 точек, расположенных по ширине заготовки на равном (3,0 мм) расстоянии друг от друга в центральной по длине зоне калибра (на равном расстоянии от входного и выходного концов раската) (рис. 3).

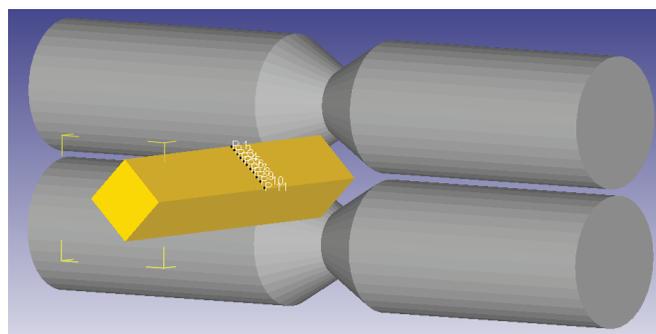


Рис. 3. Схема нанесения точек при моделировании процесса прокатки в интерфейсе программы DEFORM 3D

По полученным данным (рис. 4) в центральной зоне калибра наблюдается только вертикальное перемещение металла в направлении обжатия (величина горизонтального смещения равна нулю); в боковых зонах поверхностные слои металла одновременно перемещаются в направлении обжатия и в горизонтальной плоскости по направлению от центра калибра к его периферии. При этом ширина зоны, где имеет место перемещение металла только в вертикальном направлении, в значительной степени зависит от формы калибра. Так, если при прокатке квадратной заготовки в ящичном калибре протяженность такой зоны составила около 20 % от ширины калибра, то при деформации квадратной заготовки в ромбическом и овальном калибрах только вертикальное перемещение металла фактически имеет место лишь в вершинах калибров.

Следует отметить, что полученные данные об особенностях перемещения металла в различных зонах калибра согласуются с результатами исследований [6, 7], в которых при проведении промышленных экспериментов также зафиксировано значительное горизонтальное смещение металла на равном расстоянии от оси калибра и боковых граней и отсутствие горизонтального перемещения в вершине калибра.

Сопоставление результатов математического моделирования течения металла с полученной схемой напряженно-деформированного состояния позволило сделать вывод, что наибольшее использование запаса

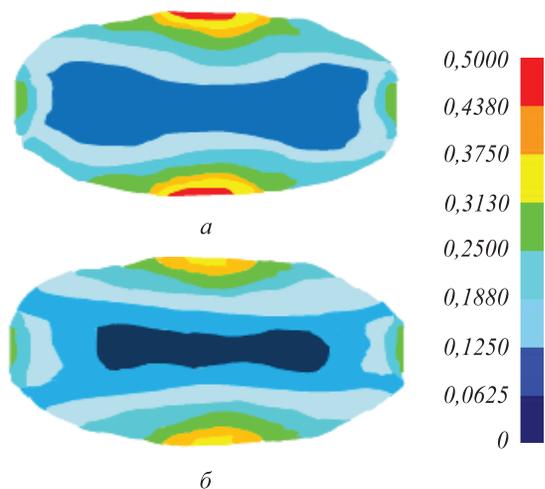


Рис. 2. Зависимость распределения значений критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската от формы исходной заготовки при деформации в овальном калибре заготовки квадратного поперечного сечения (а) и заготовки овального поперечного сечения (б)

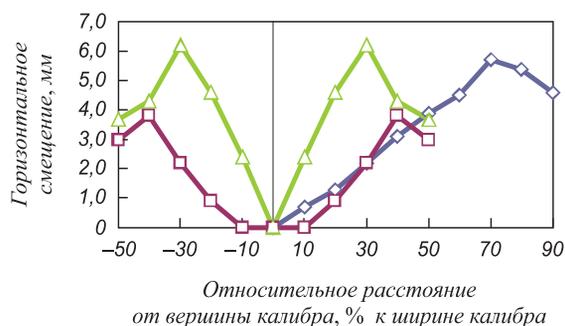


Рис. 4. Горизонтальное смещение поверхностных слоев металла при прокатке квадратной заготовки в овальном (Δ), ромбическом (◇) и ящичном (□) калибрах

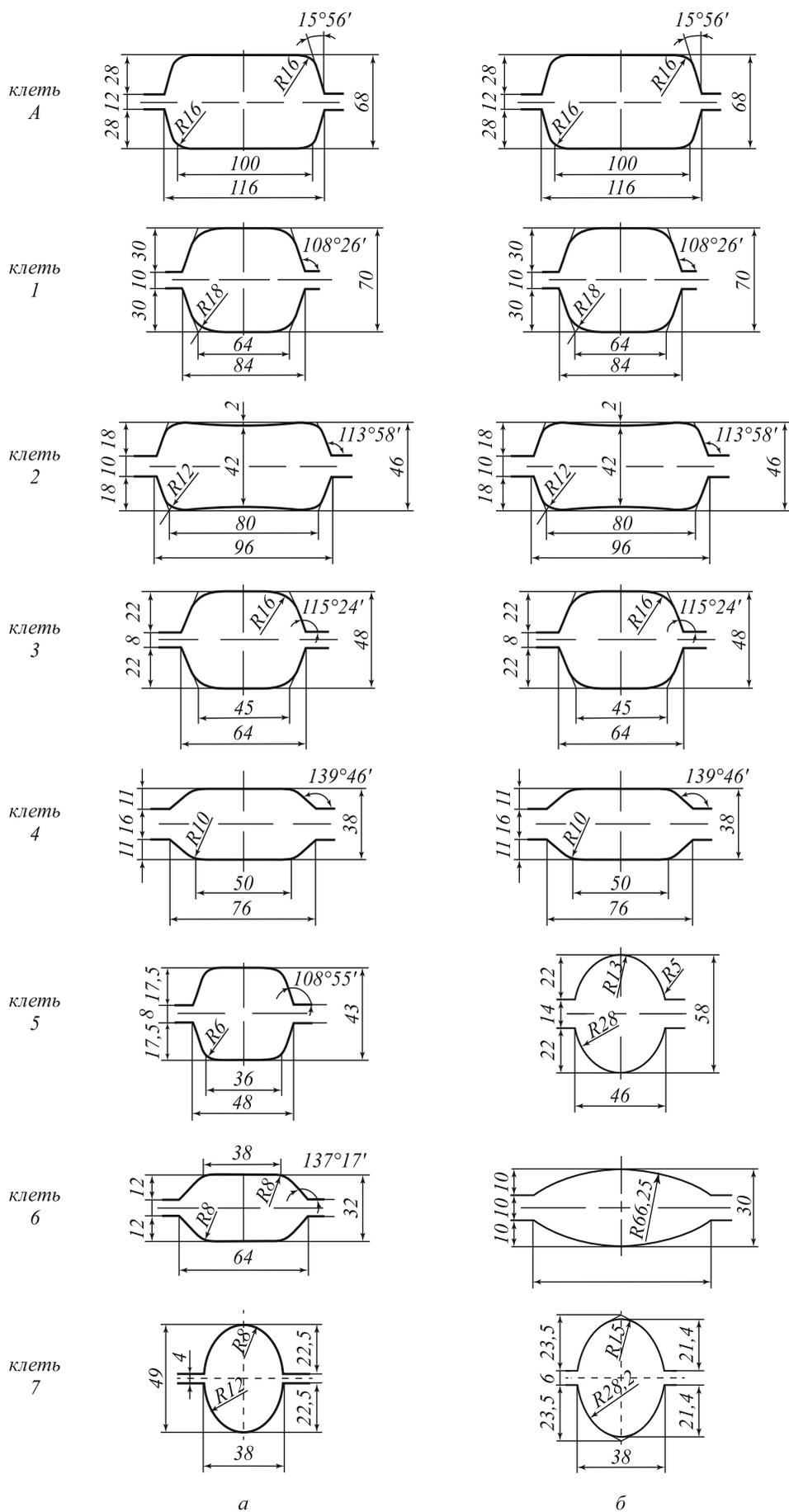


Рис. 5. Базовая (а) и новая (б) калибровка валков черновой группы клетей мелкосортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

пластичности происходит в тех зонах калибра, где имеет место только вертикальное перемещение металла при деформации. При одновременном течении металла в направлении обжатия и в горизонтальном направлении схема напряженно-деформированного состояния приобретает более благоприятный характер и способствует лучшей выработке поверхностных дефектов.

На основании полученных данных разработана новая калибровка валков черновой группы непрерывного мелкосортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» [8], отличительными особенностями которой явились замена ящичного и шестигранного калибров клетей 5 и 6 на ребровой овалный и овалный калибры соответственно, а также изменение формы и размеров ребрового овалного калибра клетки 7 (рис. 5). По результатам опытно-промышленного опробования новой калибровки установлено, что выкатываемость поверхностных дефектов увеличивается в 1,18 – 1,25 раза. Внедрение указанной калибровки валков позволило увеличить выход годного при производстве конструкционного проката по ГОСТ 10702 – 78 на 3 % при одновременном уменьшении загрузки приводов клетей. Экономический эффект составил 723,7 тыс. руб. в год.

**Выводы.** В результате моделирования процесса деформации металла в калибрах различной формы с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM 3D установлено, что независимо от формы калибра и формы поперечного сечения исходного подката наиболее неблагоприятная схема напряженно-деформированного состояния металла характерна для поверхностных слоев раската в центральной зоне калибра; показано, что наиболее благоприятная схема напряженно-деформированного состояния создается при высокой степени подобия формы исходной заготовки и используемых для прокатки калибров, что способствует увеличению выработки поверхностных дефектов в процессе прокатки; определены закономерности перемещения поверхностных слоев металла в процессе деформации. Согласно полученным данным в центральной зоне калибра имеет место только

вертикальное перемещение металла в направлении обжатия, а в боковых зонах поверхностные слои металла одновременно перемещаются в направлении обжатия и в горизонтальной плоскости по направлению от центра калибра к его периферии; установлена взаимосвязь между течением металла в различных зонах сортовых калибров при прокатке и напряженно-деформированным состоянием металла – наибольшее использование запаса пластичности происходит в тех зонах калибра, где имеет место только вертикальное перемещение металла при деформации. На основании полученных теоретических зависимостей разработана новая калибровка валков черновой группы непрерывного мелкосортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», внедрение которой позволило увеличить выход годного при производстве конструкционного проката по ГОСТ 10702 – 78 на 3 % за счет повышения выкатываемости поверхностных дефектов заготовок в 1,18 – 1,25 раза.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кинзин Д.И., Рычков С.С. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2011. № 1. С. 92 – 95.
2. Шилов В.А., Литвинов Р.А., Шварц Д.Л. // Производство проката. 2009. № 8. С. 20 – 25.
3. Тинигин А.Н. // Сталь. 2012. № 7. С. 31 – 34.
4. Салганик В.М., Песин А.М., Чикишев Д.Н., Пустовойтов Д.О. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 3. С. 22 – 24.
5. Уманский А.А., Мартьянов Ю.А. // Вестник горно-металлургической секции РАЕН академии естественных наук. Отделение металлургии. Сборник научных трудов. – Москва – Новокузнецк, 2012. Вып. 30. С. 51 – 58.
6. Зильберг Ю.В., Ревякин С.В. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1996. № 8. С. 23 – 25.
7. Зильберг Ю.В., Родман М.М., Ревякин С.В., Боровенский Е.А. // Сталь. 1991. № 10. С. 33 – 36.
8. Кадыков В.Н., Мартьянов Ю.А., Уманский А.А. // Вестник горно-металлургической секции РАЕН академии естественных наук. Отделение металлургии. Сборник научных трудов. – Москва – Новокузнецк, 2011. Вып. 27. С. 132 – 136.

© 2014 г. А.А. Уманский, В.Н. Кадыков,  
Ю.А. Мартьянов  
Поступила 12 марта 2013 г.