

дрикс, Х.М. Айхингер, М. Йокш, Г.П, Домельс // Чёрные металлы.- 1998.- июль-август.- С. 108-118. 14. Задачи по энергосбережению в ГМК Украины и пути их решения / Сталинский Д.В., Ботштейн В.А., Каневский А.М. и др./ Материалы научно-практического семинара Энергосберегающие технологии. Перспективы их внедрения на предприятиях металлургической отрасли», Донецк, 2006. - 56 с. 15. Задорский В.М. Системный подход к решению вопросов экологизации и энергосбережения. / Материалы научно-практического семинара «Энергосберегающие технологии. Перспективы их внедрения на предприятиях металлургической отрасли», Донецк, 2006. - 56 с.

**УДК 621.771.25:51.001.57:539.2.001.18**

**ЖУЧКОВ С. М.**, докт. техн. наук, проф., ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**РАЗДОБРЕЕВ В.Г.**, канд. техн. наук, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**ПАЛАМАРЬ Д.Г.**, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**ИВАНОВ А.П.**, ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск  
**ВОРОБЕЙ С.А.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИЧМ НАНУ, г. Днепропетровск

## **КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОТОВОГО ПРОКАТА**

Рассмотрены процессы непрерывной сортовой прокатки и последующего термоупрочнения арматурного проката, произведенного способом многоручьевого прокатки-разделения на пять ниток. Предложена комплексная математическая модель для расчета энергосиловых параметров прокатки и прогнозирования микроструктуры и механических свойств.

Ключевые слова: непрерывная сортовая прокатка, арматурный прокат, микроструктура, механические свойства, математическая модель.

Розглянуто процеси безперервної сортової прокатки та наступного термозміцнення арматурного прокату, виробленого способом багаторівчавкової прокатки-розділення на п'ять ниток. Запропонована комплексна математична модель для розрахунку енергосилових параметрів та прогнозування микроструктури й механічних властивостей.

Ключові слова: безперервна сортова прокатка, арматурний прокат, микроструктура, механічні властивості, математична модель.

The processes continuous rolling and subsequent heat treatment reinforcing bars made by a way multislitt of dividing rolling on five of roll are considered. The complex mathematical model for account the force, moment and capacity of parameters rolling both forecasting of microstructure and mechanical properties.

Key words: continuous rolling, reinforcing bar, microstructure, mechanical properties, mathematical model.

В условиях мирового кризиса и жесткой конкуренции для металлургической отрасли весьма актуальными остаются вопросы повышения требований по качеству металлопродукции, получение необходимого структурного состояния и свойств, обеспечивающих высокую технологичность при ее переработке в различных отраслях народного хозяйства страны.

Непрерывные мелкосортные и проволочные станы являются наиболее современными высокопроизводительными агрегатами, технологический процесс на которых характеризуется строгой поточностью и согласованностью, что в принципе позволяет осуществлять его в узких интервалах изменения параметров. Внедрение в

практику сортопрокатного производства непрерывных станов позволило существенно увеличить единичную производительность агрегатов, однако при этом проявились недостатки этого процесса, связанные с ухудшением структурного состояния и служебных свойств готовой продукции. Например, для основного марочного сортамента при производстве сортовых профилей и катанки температура начала прокатки регламентируется обычно в пределах 1200-1150 °С [1], а температура конца прокатки – 1190-900 °С. Однако для современных непрерывных мелкосортных и проволочных станов характерным являются более высокие температуры конца прокатки 1140-1020 °С, что способствует повышенному окалинообразованию и обезуглероживанию, ухудшает формирование требуемой микроструктуры и в целом комплекса физико-механических свойств готового проката.

В 90-тые годы XX столетия в мировой практике выпуска металлопроката наметилась тенденция уменьшения доли сортового проката в общем объеме его производства. В то же время производство мелкосортного проката и катанки заметно возросло, что потребовало реконструкции старых и сооружения новых агрегатов, производящих эту продукцию [2]. С 1995 г. в мире введено в эксплуатацию 120 новых сортовых станов и кардинально реконструированы более 80 станов [3, 4]. Технологии прокатки на этих станах удалось поднять на более высокий уровень для обеспечения более высоких требований к геометрическим размерам проката и его механическим свойствам. Осуществляется совершенствование температурного режима прокатки и последующей термомеханической обработки проката.

Наиболее массовым видом металлопродукции мелкосортных станов является арматурный прокат для железобетонных конструкций и его производство относится к числу быстро развивающихся сегментов металлургии. За последние 25-30 лет выпуск арматурного проката в мире вырос более чем вдвое и достигает почти 100 млн. т в год, или 10 % общемирового производства проката. Наибольшее распространение получила унифицированная свариваемая арматура класса Ат500С [5, 6]. Выпуск стержневой термомеханически упрочненной арматуры периодического профиля классов Ат500С и Ат400С из углеродистой стали составил в России в 2006 году 3535 тыс. т., а в 2007 году – уже 4000 тыс. т. Согласно прогнозам он должен возрасти к 2010 году до 4,5-5,5 млн. т. и до 5,5-6,0 млн. т. к 2015 году [7].

В то же время наиболее перспективным в связи с развитием строительства мостов, защитных оболочек атомных реакторов и других большепролетных и специальных сооружений из железобетона является промышленное производство высокопрочного термомеханически упрочненного арматурного проката классов Ат800 и Ат1000 [5, 6].

Решить проблему повышения качества проката можно при осуществлении комплекса технических и технологических решений, в том числе и за счет разработки технологических режимов, позволяющих получать прокат с заданными показателями качества. Современный подход к проектированию технологических процессов основывается на разработке математических моделей, использование которых позволяет проследивать формирование показателей качества по всей технологической линии прокатного стана в широких диапазонах изменения параметров процесса.

В Институте черной металлургии НАН Украины разработано комплексное программное обеспечение (ПО), позволяющее рассчитывать и анализировать температурные, деформационные, скоростные, энергосиловые параметры процесса прокатки и прогнозировать структуру и механические свойства готового проката. На ос-

нове расчета и анализа технологических параметров процесса прокатки и последующего охлаждения появляется возможность оптимизации конструктивно-структурного состава прокатного стана, режимов прокатки и последедеформационной обработки с позиций обеспечения требуемого комплекса показателей качества производимой продукции, а также разрабатывать технологические режимы производства проката из новых марок стали. Алгоритм расчета приведен на рис. 1.

Для оценки возможности производства арматурного проката с обеспечением оптимальной температуры конца прокатки  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях мелкосортного стана 320 БМЗ провели вычислительный эксперимент по определению энергосиловых параметров прокатки при производстве термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки 25Г2С, получаемой методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм. Вычислительный эксперимент выполняли с использованием разработанной комплексной математической модели. Согласно заводской технологии скорость прокатки указанного профиля составляет 14 м/с, температура раската на выходе из 2-ой клетки стана составляет  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура конца прокатки (на выходе из последней чистой клетки стана) порядка  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Из анализа табл. 1 видно, что усилие прокатки в 1, 5 и 19 рабочих клетях превышает допустимые их технической характеристикой значения. В то же время значения момента и мощности прокатки находятся в пределах допустимых.

Поэтому для реализации процесса многониточной прокатки-разделения на пять ниток арматурного профиля №10 из заготовки сечением 140x140 мм необходимо либо перераспределение обжатий по клетям стана, либо изменение существующего температурно-скоростного режима прокатки. В табл. 2 представлены результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки 25Г2С, получаемой методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм после изменения режима обжатий в перегруженных клетях стана.

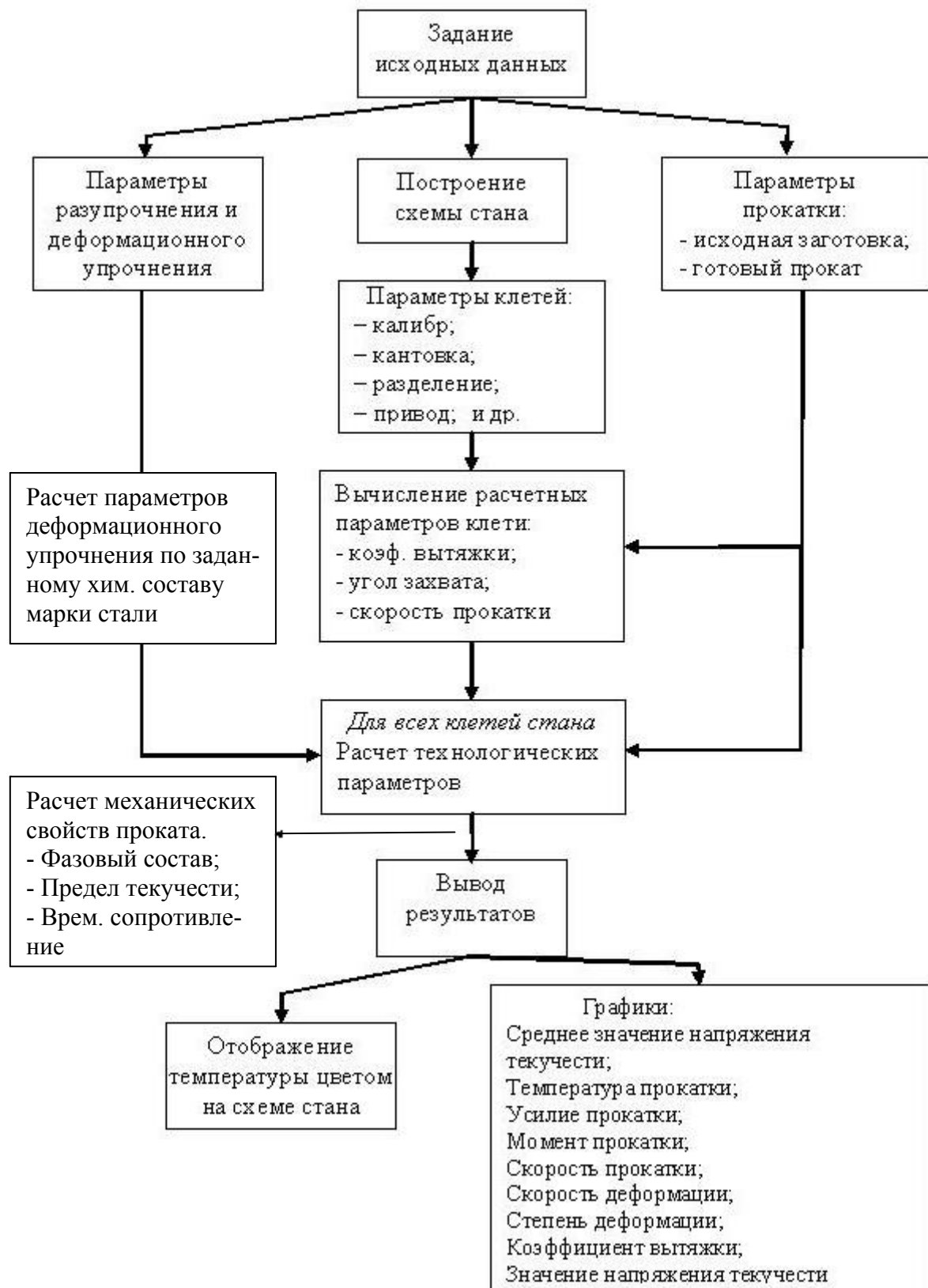


Рис. 1. Описание схемы работы программы расчета технологических параметров при непрерывной прокатке и прогнозирование структуры и механических свойств сортового проката и катанки

Таблица 1

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки 25Г2С

№ клетки	P, кН	M, кН*м	N, кВт	P <sub>max</sub> , кН	M <sub>max</sub> , кН*м	N <sub>max</sub> , кВт
1	1720,2	138,8	231,86	1450	151	540
2	1140,3	88,1	198,49	1450	151	540
3	1323,1	86,2	242,59	1450	151	540
4	906,3	66,2	249,82	1450	151	540
5	959,1	46,7	327,28	850	72	540
6	627,9	33,9	334,04	850	72	540
7	627,7	26,1	317,35	850	72	540
8	507,6	23,5	397,61	850	72	540
11	601,9	20,5	490,09	629	37,5	900
12	384,7	9,2	283,87	629	37,5	900
13	56,5	1,7	64,15	591	37,5	900
14	220,4	3,9	161,97	591	37,5	900
16	189,7	2,8	140,72	478	37,5	900
18	205,5	2,8	163,03	591	37,5	900
19	635,4	6,4	420,65	478	37,5	900
20	172,6	3,6	304,79	591	37,5	900

Из анализа табл. 2 видно, что после изменения режима обжатий в перегруженных клетях и переноса части деформации в другие клетки ограничения были устранены.

Таким образом, изменение режима обжатий позволяет производить указанный арматурный профиль №10 из стали марки 25Г2С оптимального состава, получаемый методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм с сохранением существующего на стане температурно-скоростного режима прокатки и не требует изменения конструктивно-структурного состава стана.

С использованием разработанного программного комплекса выполнены расчеты прогнозирования структуры и механических свойств арматурного проката диаметром 10 мм из стали марки 25Г2С с целью гарантированного обеспечения требований класса Ат800 ( $\sigma_T \geq 800$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_B \geq 1000$  Н/мм<sup>2</sup>,  $\delta_5 \geq 8$  %).

Результаты расчетов показали, что влияние накопленной степени деформации на механические свойства незначительно. Влияние температуры конца прокатки при обеспечении постоянной температуры самоотпуска также незначительно. В тоже время варьирование температурой конца прокатки при постоянной схеме последовательного охлаждения (параметрах трассы охлаждения) существенно влияет на механические свойства проката посредством влияния температуры самоотпуска (рис. 2).

Таблица 2

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса прокатки термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-800 из стали марки

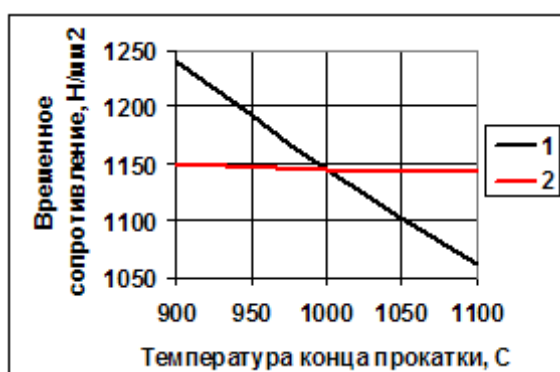
№ клетки	P, кН	M, кН*м	N, кВт	P <sub>max</sub> , кН	M <sub>max</sub> , кН*м	N <sub>max</sub> , кВт
1	1441,5	117,0	190,65	1450	151	540
2	943,5	64,6	145,68	1450	151	540
3	1317,8	85,6	241,62	1450	151	540
4	911,8	66,4	251,34	1450	151	540
5	849,8	41,6	284,74	850	72	540
6	498,4	23,5	230,00	850	72	540
7	586,9	24,7	296,70	850	72	540
8	378,3	18,2	296,34	850	72	540
11	482,3	17,3	392,73	629	37,5	900
12	349,6	8,6	257,97	629	37,5	900
13	41,0	1,2	46,60	591	37,5	900
14	208,0	3,7	152,83	591	37,5	900
16	177,3	2,7	131,51	478	37,5	900
18	195,1	2,7	154,77	591	37,5	900
19	473,6	4,1	269,97	478	37,5	900
20	118,2	2,3	188,03	591	37,5	900



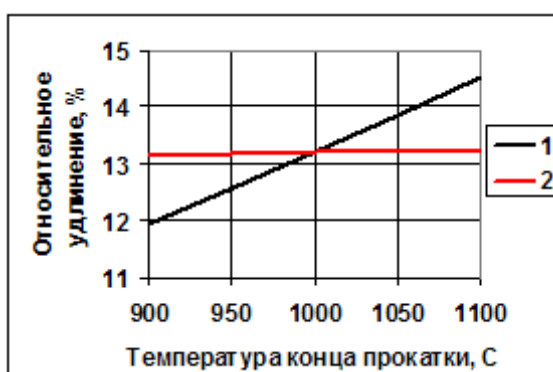
а



б



в



г

Рис. 2. Влияние температуры конца прокатки на температуру самоотпуска (а) и механические свойства арматурного проката диаметром 10 мм из стали марки 25Г2С (б-г): 1 – при постоянной трассе охлаждения; 2 – при постоянной температуре самоотпуска

Из рис. 2 видно, что наиболее оптимальной температурой конца прокатки для осуществления последующей термомеханической обработки проката с целью получения заданного комплекса свойств (оптимального соотношения прочностных и пластических свойств) готового арматурного проката из стали марки 25Г2С является 1000 °С. При этом было спрогнозировано, что в результате последующей термической обработки формируется приблизительно 80 % самоотпущенного мартенсита и приблизительно 20 % бейнита. Результаты расчетов были проверены при проведении прокаток на стане 320 БМЗ (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Химический состав плавов стали марки 25Г2С

№ п/п	Содержание химических элементов, %							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	0,251	1,31	0,71	0,022	0,022	0,065	0,11	0,23
2	0,26	1,28	0,7	0,017	0,04	0,069	0,13	0,26

Таблица 4

Сравнение расчетных и экспериментальных значений механических свойств арматурного проката диаметром 10 мм из стали марки 25Г2С

№ п/п	Значения механических свойств					
	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>		$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>		$\delta_5$ , %	
	Экспериментальные	Расчетные	Экспериментальные	Расчетные	Экспериментальные	Расчетные
1	<u>870-920</u> 885	907	<u>1120-1180</u> 1143	1145	<u>9,5-15</u> 11,9	13,2
2	<u>870-960</u> 914	944	<u>1130-1210</u> 1168	1184	<u>9,2-14,5</u> 11,6	12,9

Приведенные данные показывают удовлетворительную точность прогнозирования механических свойств арматурного проката. В ходе микроструктурных исследований установлено, что в термически упрочненном арматурном прокате диаметром 10 мм образуется 79-83 % самоотпущенного мартенсита и 17-21 % бейнита. Полученные данные позволяют рекомендовать комплексную математическую модель для расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной сортовой прокатки и прогноза механических свойств готового термомеханически упрочненного арматурного проката.

Выводы

1. С использованием разработанного комплексного программного обеспечения, позволяющего моделировать процесс непрерывной сортовой прокатки и прогнозировать механические свойства готового проката провели вычислительный эксперимент для получения в готовом прокате заданного комплекса свойств при производстве термомеханически упрочненного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат-V из стали марки 25Г2С, получаемого методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм в условиях стана 320 БМЗ.

2. В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что усилие прокатки в 1, 5 и 19 рабочих клетях превышает допустимые их техниче-

ской характеристикой значения. В то же время значения момента и мощности прокатки находятся в пределах допустимых.

3. Предложено, что снять ограничения по усилиям прокатки можно перераспределением обжатий по клетям стана.

После изменения режима обжатий в перегруженных клетях и переноса части деформации в другие клетки ограничения были устранены.

Таким образом, изменение режима обжатий позволяет производить указанный арматурный профиль №10 из стали марки 25Г2С оптимального состава, получаемый методом прокатки-разделения на пять ниток из заготовок сечением 140x140 мм с сохранением существующего на стане температурно-скоростного режима прокатки и не требует изменения конструктивно-структурного состава стана.

4. Результаты расчетов показали, что наиболее оптимальной температурой конца прокатки для осуществления последующей термомеханической обработки проката с целью получения заданного комплекса свойств (оптимального соотношения прочностных и пластических свойств) готового арматурного проката из стали марки 25Г2С является 1000 °С.

При этой температуре конца прокатки и температура самоотпуска (порядка 425-430 °С) является оптимальной для термомеханически упрочненного арматурного проката диаметром 10 мм класса прочности Ат800.

5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных, полученных при производстве термомеханически упрочненного арматурного проката из стали марки 25Г2С показало удовлетворительную сходимость прогнозируемых и фактических значений механических свойств.

**Список литературы:** 1. Теория прокатки / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. Справочник. - М.: Металлургия, 1985. - 235 с. Е.С. Глуховский. Новые технологические решения в проектах сортопрокатных цехов // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". М.- 1999. - № 7. - 8 - С.36-39. В.С. Медведев, Ю.Б. Крюков, В.В. Осипенко. Сортопрокатные станы // Металлург. 2005. Спецвыпуск. С.18-21. Л.А. Никитина, Б.Н.Матвеев. Перспективные технологии, используемые в производстве прутков и катанки за рубежом // Черная металлургия: Бюл. ин-та "Черметинформация". М. - 2003. - № 3. - С.36-44. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. – М.: Воентехлит, 2000. - 256 с. Никитина Л.А. Состояние и перспективы развития производства проката в России и за рубежом // Производство проката. – 2000. - №11. С.2-10. Производство термомеханически упрочненной стержневой арматуры / Д.Н. Макаров, Е.Н. Колельков, А.П. Диденко, А.А. Пьянков // Сталь. – 2008. - № 3. С.53-55.

**УДК 669.015**

**ЧИГИРИНСКИЙ В.В.**, докт. техн. наук, проф., ЗНТУ, г. Запорожье

**ДУБИНА В.И.**, канд. техн. наук, проф., ЗНТУ, г. Запорожье

**МИСНИК Е. Н.**, студентка, ЗНТУ, г. Запорожье

## **ЭФФЕКТЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Рассмотрены эффекты пластической деформации. Эффект дополнительного воздействия на очаг деформации и эффект кинематического воздействия на зону пластического течения металла.

Ключевые слова:

Очаг деформации, прокатка, линейки, полоса, момент.