

**Е.Я. Лезинская¹, Л.Г. Ковалева², В.В. Перчаник¹,
С.И. Пинчук¹, В.Ф. Балакин¹, Д.Г. Тишкевич¹**

¹ Национальная металлургическая академия Украины

² ГП «Научно-исследовательский конструкторско-технологический институт трубной промышленности»

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КРУЧЕНИИ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ

Аннотация. Изучено влияние степени сдвиговой деформации на формирование микроструктуры стали. Детальное изучение микроструктуры образцов после кручения при повышенных температурах позволило выделить необходимые параметры для получения структуры различных типов. Выявлено влияние степени сдвиговой деформации и способов охлаждения на процессы зарождения и роста зерен на образцах из стали аустенитного класса. Определены параметры деформации для получения равномерной рекристаллизованной структуры стали 08X18N10T. Установлена тесная взаимосвязь упрочняющих и разупрочняющих процессов вплоть до разрушения образца.

Ключевые слова: сталь, структура, сдвиговая деформация, рекристаллизация, напряжение сдвига, границы зерен, упрочнение, разупрочнение.

EFFECT OF TORSION SHEAR STRAIN RATIO UPON STEEL STRUCTURE

Abstract. Effect of shear deformation ratio upon steel microstructure was studied. Detailed study of microstructure in torsionally loaded specimens revealed parameters necessary for the production of various structure types. Effect of shear deformation ratio and cooling methods upon the processes of nucleation and growth of grains in specimens of austenitic steel has been revealed. Deformation parameters necessary for the production of a uniform structure in steel 08Cr18Ni10Ti have been determined. Close interrelation of hardening and softening processes up to the specimen fracture has been established.

Keywords: steel, structure, shear deformation, recrystallization, shear stress, grain boundaries, hardening, softening.

Управлять структурой сталей можно с помощью варьирования параметров деформации [1] и способов охлаждения после ее окончания [2]. При увеличении степени горячей деформации увеличиваются прочность и твердость металла при достаточно высоких пластических свойствах. Существенное влияние на структуру металла оказывает скорость деформации. При увеличении скорости деформации происходит уменьшение субзерен и зерен [3]. Высокие скорости способствуют подавлению динамической рекристаллизации, поэтому при увеличении скорости деформации вначале происходит разупрочнение металла, а затем наблюдается упрочнение за счет интенсивного наклепа.

При высоких температурах напряжение, вызывающее непрерывную сдвиговую деформацию для данной марки стали, достигает максимального значения, а затем падает до некоторой установившейся величины, которая не меняется до весьма высоких деформаций. Такой ход кривых «напряжение-деформация» наблюдается при скручивании образцов из чистых металлов с различным типом кристаллической решетки, а также из сталей и сплавов различных классов [4]. При упругих деформациях динамическая рекристаллизация не встречается. Аустенитные стали типа 18-8 имеют субструктуру внутри искаженных зерен после малых деформаций и повышенную плотность дислокаций. Образование зародышей динамической рекристаллизации

происходит преимущественно у границ зерен или двойников.

Структура, сформировавшаяся в ходе горячей деформации, определяет характер статического разупрочнения после ее завершения в зависимости от скорости охлаждения. Формированию весьма стабильной, устойчивой к рекристаллизации полигональной структуры способствует охлаждение на воздухе, обеспечивающее однородное распределение дислокаций в металле. Если в ходе горячей деформации происходит динамическая рекристаллизация, то выдержка при нагреве приводит к росту рекристаллизованных зерен и уменьшению внутри них количества субзерен, хотя плотность дислокаций и твердость остаются повышенными.

Для сохранения мелкозернистой структуры после окончания первичной динамической рекристаллизации и соответствующего подстуживания на воздухе рекомендуется применять интенсивное охлаждение в воде.

Структура полностью рекристаллизована по достижении постоянного напряжения сдвига. На установившейся стадии, когда структура полностью рекристаллизована, величина зерна растет с увеличением температуры деформации при постоянной скорости деформации и с уменьшением скорости деформации при постоянной температуре деформации. Величина деформации на этой стадии не оказывает влияния на

размер рекристаллизованных зерен – он зависит только от напряжения течения в процессе деформации [5].

Материалом для исследования служили образцы стали аустенитного класса 08X18H10T. Образцы диаметром 5 мм с длиной рабочей части 15 мм изготавливали из металла после термообработки при температуре 1250 °С с выдержкой 3 ч и охлаждением с печью. Такая обработка обеспечивала структуру заготовки с исходным крупным зерном со средним диаметром 353 мкм.

Кручения проводили на машине СМЭГ-10Т, снабженной электромагнитной муфтой для подключения активного захвата к электродвигателю по заданной программе.

Скручивание проводили при температуре 1200 °С со скоростью вращения активного захвата 60 1/мин. Пассивный захват при этом не был закреплен, чтобы исключить возникновение осевых усилий в образце.

Исследования микроструктуры проводили на наружной поверхности шлифов, вырезанных в поперечном направлении. Микроструктуру плоского среза выявляли электролитическим травлением в концентрированной азотной кислоте. Обработку микрофотографий проводили по специальной программе «Structure 2001» [6], обеспечивающей всесторонний анализ первичных данных методом хорд после распознавания и реконструкции структуры с определением среднего диаметра зерна плоского среза и объема с соответствующими коэффициентами вариации, характеризующими раззернистость.

В ходе детального изучения микроструктуры образцов после кручения при повышенных температурах

установлено, что упрочнение металла происходит за счет деформации исходных крупных зерен в направлении действующей нагрузки, а разупрочнение – за счет образования мелких рекристаллизованных зерен. Роль разупрочняющих процессов возрастает на начальных стадиях кручения, а в дальнейшем упрочнение и разупрочнение уравниваются.

Начальные стадии горячей деформации характеризуются созданием в металле горячего наклепа с неупорядоченным распределением дислокаций в его объеме [7]. Эта неоднородность сказывается и на трансформации исходных крупных зерен. При температуре 1160 °С происходит укрупнение выделений по границам исходных зерен, а в самих зернах – образование большого количества двойников отжига и малоугловых границ. Аналогичные закономерности наблюдаются и при температуре 1200 °С, но при более высокой температуре происходит более интенсивный сброс горячего наклепа. Границы зерен во многих случаях очищаются от выделений, что обуславливает образование мелких рекристаллизованных зерен на этих участках (рис. 1, *a – в*). При охлаждении на воздухе описанные процессы происходят более полно, затрагивая и тело исходных крупных зерен (рис. 1, *г – е*). Напряжение течения при этом снижается с 105 до 94 МПа.

С увеличением степени горячей деформации разупрочнение проходит более интенсивно за счет вовлечения тела зерна в рекристаллизацию пограничных зон. Это разупрочнение может реализовываться также путем динамического возврата и полигонизации с последующей первичной рекристаллизацией. При

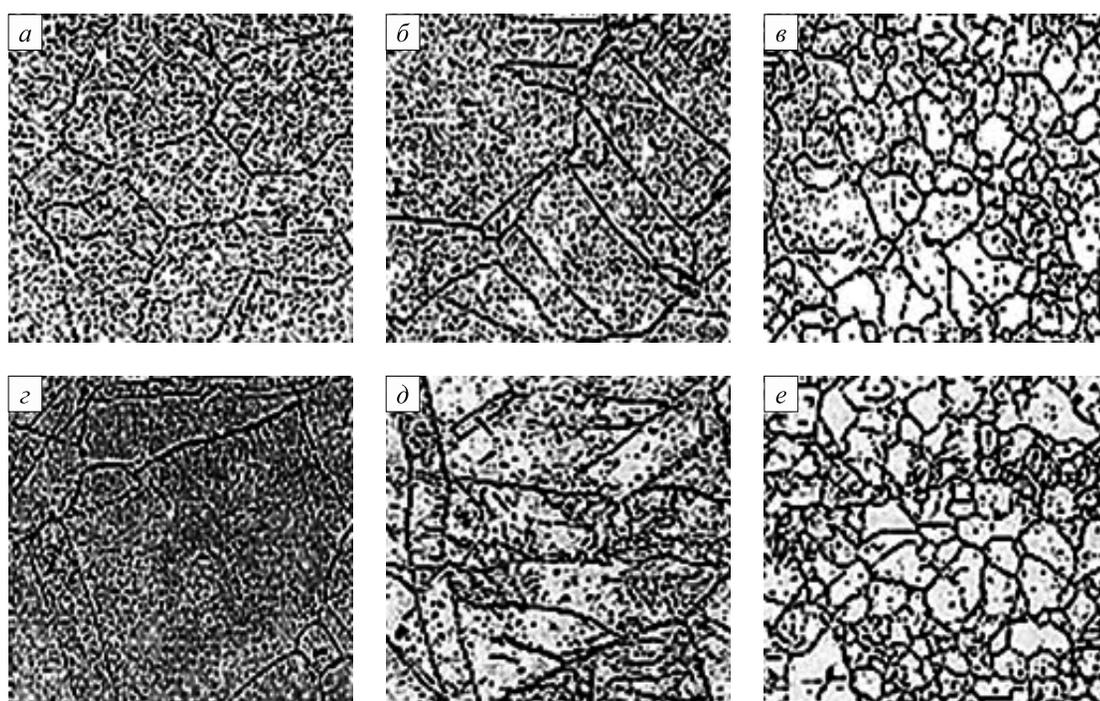


Рис. 1. Структура стали 08X18H10T после кручения в непрерывном режиме при температуре 1200 °С с последующим охлаждением в воде (*a – в*) и на воздухе (*г – е*):
a, г – 0,5 оборота; *б, д* – 1,0 оборот; *в, е* – 2,5 оборота

этом наблюдается трансформация от неустойчивости структуры с большим количеством незамкнутых границ (рис. 1, *в, е*) до мелких рекристаллизованных зерен диаметром 25 – 30 мкм при более высоких степенях деформации (рис. 2). Хотя температуры деформации достаточно высоки (1160 и 1200 °С), рекристаллизованные зерна довольно устойчивы и сохраняются до весьма высоких степеней деформации (см. таблицу).

Дальнейшее увеличение деформации обеспечивает структурообразование по механизму собирательной ре-

кристаллизации. Растущие рекристаллизованные зерна образовались в разное время, и поэтому наблюдается целый спектр структурных состояний: зерна с большим количеством двойников и малоугловых границ, характерные для малых деформаций; структура с незамкнутыми границами, характерная для упрочненного состояния; зерна правильной формы с высокоугловыми замкнутыми границами.

Структура, сформировавшаяся при этих же условиях, но с охлаждением на воздухе, имеет значительные неод-

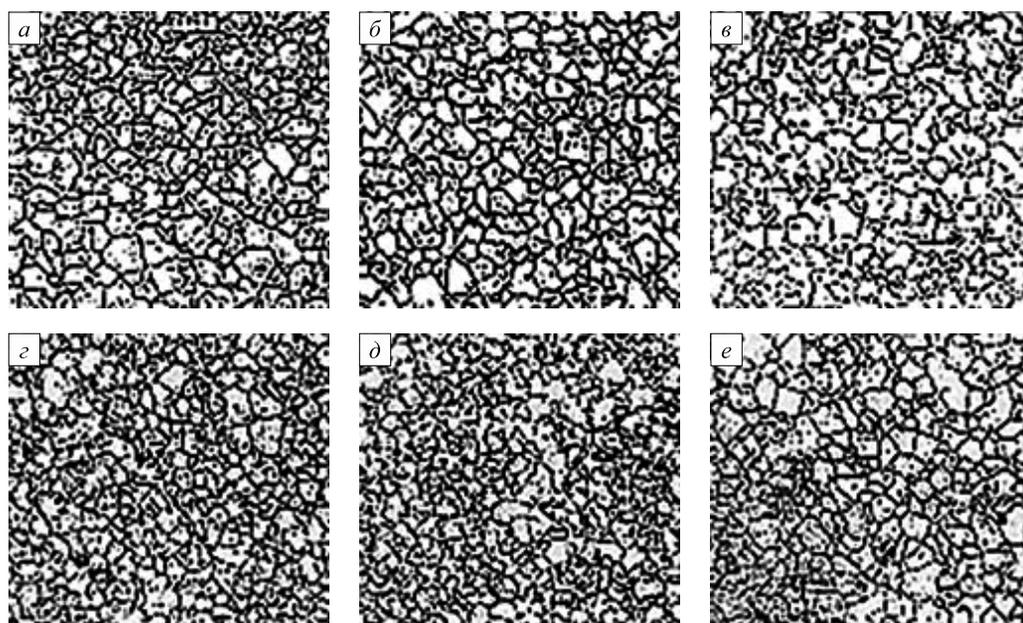


Рис. 2. Структура стали 08X18N10T после кручения в непрерывном режиме при температуре 1200 °С с последующим охлаждением в воде (*а – в*) и на воздухе (*з – е*): *а, з* – 5,0 оборотов; *б, д* – 7,5 оборотов; *в, е* – 10,0 оборотов

Параметры деформации и структуры стали*

Параметры структуры стали после деформации	Количество оборотов <i>n</i> активного захвата								
	0,5	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	22,5
Угол сдвига γ , рад	0,482	0,808	1,206	1,382	1,444	1,476	1,495	1,507	1,528
Эквивалентная условная линейная деформация ϵ , %	21,2	32,6	43,5	47,5	48,9	49,5	49,9	50,1	50,6
Максимальный диаметр зерна, мкм	$\frac{360}{360}$	$\frac{360}{-}$	$\frac{245}{160}$	$\frac{100}{105}$	$\frac{85}{100}$	$\frac{95}{115}$	$\frac{95}{110}$	$\frac{95}{120}$	$\frac{80}{100}$
Плоский срез									
Средний диаметр зерна <i>d</i> , мкм	$\frac{199,8}{185,9}$	$\frac{101,8}{-}$	$\frac{49,6}{43,3}$	$\frac{22,2}{23,9}$	$\frac{26,0}{24,6}$	$\frac{28,0}{29,4}$	$\frac{30,8}{27,9}$	$\frac{27,2}{31,2}$	$\frac{18,4}{31,4}$
Коэффициент вариации K_d	$\frac{0,51}{0,65}$	$\frac{0,86}{-}$	$\frac{0,79}{0,72}$	$\frac{0,67}{0,70}$	$\frac{0,59}{0,57}$	$\frac{0,61}{0,66}$	$\frac{0,59}{0,66}$	$\frac{0,61}{0,68}$	$\frac{0,75}{0,60}$
Объем									
Средний диаметр зерна <i>D</i> , мкм	$\frac{244,3}{227,2}$	$\frac{123,0}{-}$	$\frac{59,9}{50,9}$	$\frac{24,8}{28,3}$	$\frac{30,8}{29,0}$	$\frac{33,3}{35,1}$	$\frac{36,9}{33,2}$	$\frac{32,3}{35,9}$	$\frac{21,7}{37,6}$
Коэффициент вариации K_D	$\frac{0,43}{0,58}$	$\frac{0,82}{-}$	$\frac{0,74}{0,69}$	$\frac{0,66}{0,67}$	$\frac{0,54}{0,52}$	$\frac{0,57}{0,61}$	$\frac{0,54}{0,62}$	$\frac{0,56}{0,66}$	$\frac{0,72}{0,55}$

* В числителе указаны значения после охлаждения в воде, в знаменателе – на воздухе.

нородности вследствие указанных выше причин. Напряжение пластического сдвига составляет при этом 92 МПа.

Дальнейшее увеличение деформации не приводит ни к вторичной рекристаллизации, ни к существенному росту зерен при собирательной рекристаллизации (рис. 3), несмотря на весьма высокие температуры формоизменения. Это обусловлено тем, что структурные изменения идут преимущественно внутри вновь образовавшихся зерен. При этом структуры характеризуются меньшей разнородностью, чем на начальных стадиях кручения. Напряжения пластического сдвига увеличиваются до 98 МПа при 12,5 оборотах и до 104 МПа при 15 оборотах.

В силу «затухания» процессов рекристаллизации при малых деформациях ($n < 15$) скорость охлаждения не оказывает существенного влияния на конечную величину зерна после охлаждения.

При дальнейшем кручении с увеличением степени сдвиговой деформации влияние способа охлаждения на средний диаметр зерен становится более существенным. При этом рекристаллизованные зерна продолжают насыщаться дислокациями и это насыщение, как и ранее, неоднородно. Явление повторного разупрочнения металла приводит к образованию весьма мелких зерен диаметром 2 – 11 мкм по границам рекристаллизованных зерен диаметром

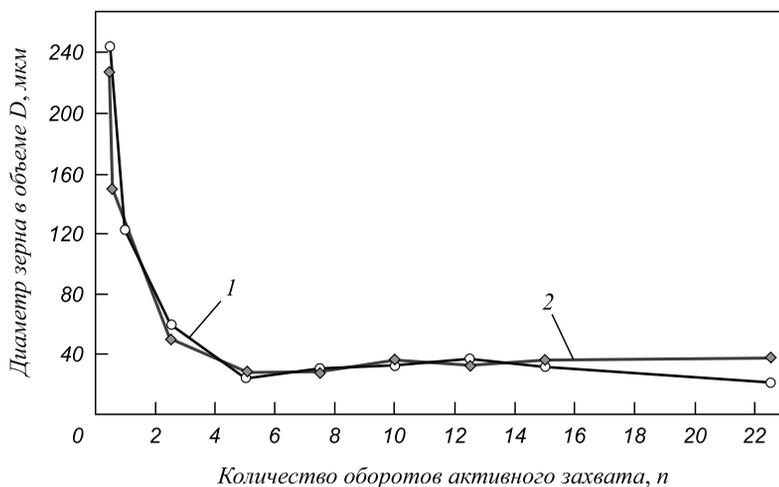


Рис. 3. Изменение среднего диаметра зерен стали 08X18H10T в зависимости от количества оборотов активного захвата в непрерывном режиме скручивания при температуре 1200 °С:

1 – охлаждение в воде; 2 – на воздухе

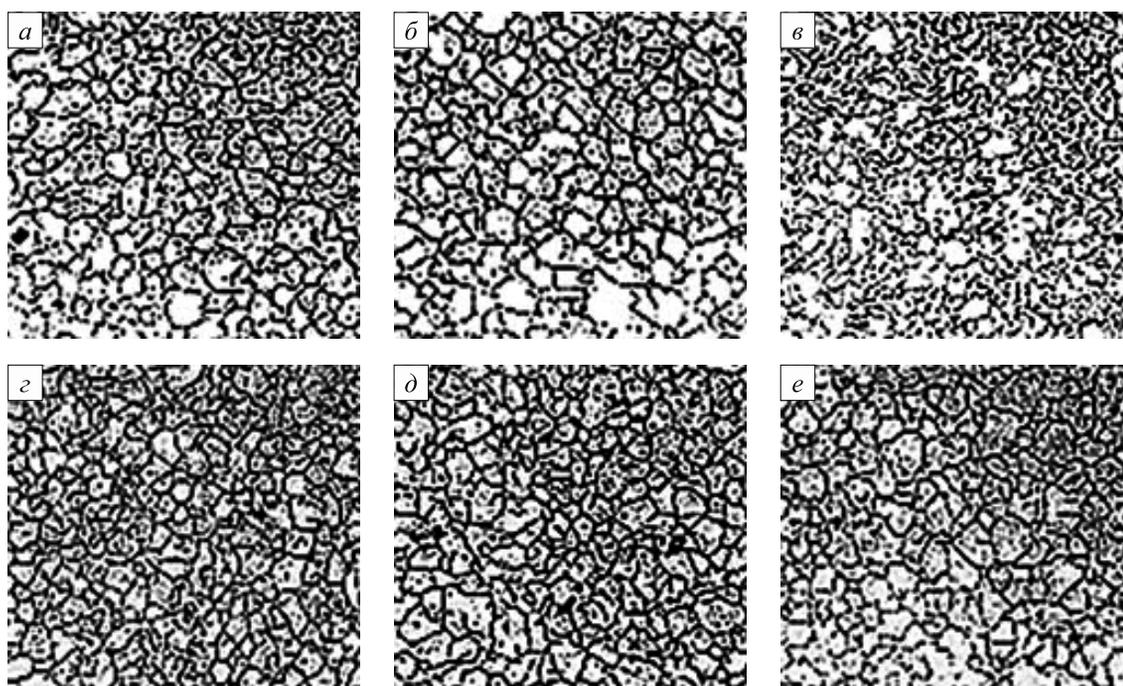


Рис. 4. Структура стали 08X18H10T после кручения в непрерывном режиме при температуре 1200 °С с последующим охлаждением в воде (а – в) и на воздухе (г – е): а, г – 12,5 оборотов; б, д – 15,0 оборотов; в, е – 22,5 оборотов

35 мкм (рис. 4). Кручение в 22,5 оборота при температуре 1200 °С с последующим охлаждением в воде увеличивает напряжение пластического сдвига до 135 МПа.

Можно предположить, что если бы деформация не была прервана разрушением образцов, описанные выше процессы структурообразования повторились бы вновь, но исходной структурой для них были бы зерна диаметром 40 – 50 мкм.

Выводы. Результаты исследования свидетельствуют о том, что в ходе непрерывного горячего скручивания на начальных его стадиях металл существенно упрочняется, после чего следует его интенсивное разупрочнение до установившегося состояния. Такое поведение металла будет повторяться вновь и вновь до его разрушения.

Исходная микроструктура в результате деформирования претерпевает существенные изменения – происходит измельчение зерна в 20 – 30 раз, от 350 мкм до 10 – 20 мкм.

Структура на начальных стадиях деформации характеризуется повышенной разнотернистостью, которая по мере увеличения степени деформации снижается.

При деформации в 5 оборотов наблюдается рекристаллизованная структура с минимальным средним

размером зерна 20 – 35 мкм. Дальнейшее увеличение степени деформации не приводит к существенному изменению размеров зерен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
2. Горелик С.С., Гуль Ю.П. и др. // МитОМ. 1971. № 7. С. 5 – 9.
3. Булат С.И., Тихонов А.С., Дубровин А.Н. Деформируемость структурно неоднородных сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1975. – 352 с.
4. Дроздов Б.Я., Погребная Н.Э. // Исследование структуры горячедеформированного аустенита. Сб. «Термическая обработка металлов». – М.: 1980. № 9. С. 84 – 87.
5. Tonas T.T., Sellars C.M., Tegart W.T. // Metallurgical Reviews. 1969. Vol. 14. No. 130. P. 1 – 24.
6. Пат. 2317539 РФ. Способ определения основных параметров структуры металла / Е.Я. Лезинская, Е.В. Гулькин, В.В. Перчаник. Бюл. изобретений. 2008. № 5.
7. Берштейн М.Л. Прочность стали. – М.: Металлургия, 1974. – 198 с.

© 2013 г. Е.Я. Лезинская, Л.Г. Ковалева, В.В. Перчаник, С.И. Пинчук, В.Ф. Балакин, Д.Г. Тишкевич
Поступила 5 марта 2013 г.

УДК 621.926.323

А.Г. Никитин, С.А. Лактионов, М.А. Кузнецов

Сибирский государственный индустриальный университет

ПОЛОЖЕНИЕ ПЛОСКОСТИ МАКСИМАЛЬНЫХ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ХРУПКОГО КУСКА В ОДНОВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКЕ*

Аннотация. Предложена методика расчета положения плоскости максимальных касательных напряжений при двухосном напряженном состоянии в хрупком изотропном материале, определяющая геометрические характеристики образующихся при разрушении кусков в одновалковой дробилке. Теоретически определено и экспериментально подтверждено, что ее положение зависит от коэффициента трения куска о валок и угла захвата, а также от коэффициента трения между куском дробимого материала и щекой.

Ключевые слова: одновалковая дробилка, дробимый кусок, угол захвата, коэффициент трения, плоскость максимальных касательных напряжений.

POSITION OF THE PLANE OF MAXIMUM SHEAR STRESS AT FRACTURE OF BRITTLE PIECES INTO ROLL CRUSHERS

Abstract. The methods of calculating the position of the plane of maximum shear stress under biaxial stress state in a brittle isotropic material, which determines the geometric characteristics resulting from the destruction of the pieces in Roll Crushers. Determined theoretically and experimentally is confirmed that its position depends on the coefficient of friction of a piece of roll, and the angle of capture, as well as the coefficient of friction between the material and the piece crushability cheek.

Keywords: roll crushers, divisibility piece capture angle, the coefficient of friction, the plane of maximum shear stress.

Во многих отраслях промышленности – металлургической, горнорудной и др. перерабатывают и используют в больших количествах сыпучие материалы

различных классов крупности. В большинстве случаев нужная крупность достигается измельчением более крупных кусков на дробилках, в том числе и одновалковых, при этом важное значение для потребителя имеет форма готового продукта.

* Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом Министерства образования и науки № 7.4662.2011.