

Рис. 5. Кривые течения стали 30X3MFA, термообработка – улучшение

более точные результаты, сопоставимые с распространенными и достаточно трудоемкими испытаниями образцов в условиях сжатия, растяжения и кручения [1]. Полученные кривые течения являются интегральными, рассчитанными по усредненным деформациям в условиях объемного сжатия. Следовательно, можно рекомендовать их к использованию для расчетов процессов обработки давлением, которые характеризуются объемом напряженного состояния, с учетом идентичности условий пластического течения металла. Предложенный метод можно рекомендовать в качестве экспресс-теста получения характе-

ристик упрочняемости металла в производственных условиях.

**Библиографический список**

1. Хван Д.В. Технологические испытания материалов. - Воронеж: изд-во Воронежского университета, 1992. - 152 с.
2. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості / О.В. Грушко, В.А. Огородніков, М.І. Побережний, М.П. Єленич // Вісник ВПІ. – 2009. – № 6 (87). – С. 90-93.
3. Грушко А. В. О связи исходной твердости и кривой течения материала // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 3(132). – С. 35-40.
4. Грушко О.В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Машиностроение». – 2010. - № 60. – С. 133-137.
5. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич // 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993 – 640 с.
6. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.

Поступила 22.11.2012

УДК 621.771.

Николаев В.А. /д.т.н./, Жученко С.В.  
Запорожский НТУ

Васильев А.А.  
ОАО «МК «Запорожсталь»

Наука

**Кинематические параметры прокатки при взаимном горизонтальном смещении валков**

*Получены теоретические зависимости, устанавливающие связь между горизонтальным смещением осей рабочих валков относительно оси опорных валков в разных направлениях и кинематическими параметрами деформации полосы. Дана количественная оценка влияния степени несимметрии процесса прокатки на интенсивность снижения средних нормальных контактных напряжений. Ил. 3. Библиогр.: 3 назв.*

**Ключевые слова:** рабочий валок, опорный валок, очаг деформации, полоса, обжатие

*The theoretical dependence, establishing a connection between the horizontal displacement of the axis of the work rolls relative to the axis of backup rolls in different directions and kinematic strip deformation parameters were obtained. A quantitative estimation of the influence of the degree of asymmetry of the rolling process on the rate of decrease in average normal contact stresses is provided.*

**Keywords:** work roll, backup roll, deformation zone, strip, compression, advance

В клетях кварто непрерывных станов оси рабочих валков смещены относительно опорных по направлению прокатки на  $\epsilon = 5-7$  мм. На реверсивных станах рабочие и опорные валки устанавливают или в одной вертикальной плоскости, или смещают рабочие валки относительно опорных в одну сторону, по направлению нечетного (Н) прохода. При прокатке, например, в Н проходе, также как и на непрерывных станах, рабочие валки прижимаются к опорным валкам

и принимают устойчивое положение против перекоса (смещения) в горизонтальной плоскости.

В четном проходе на реверсивном стане рабочие валки находятся перед осями опорных валков, и силы трения в зоне отставания очага деформации действуют против направления прокатки и выталкивают рабочие валки вместе с подушками и прижимают к лапам подушек опорных валков с выборкой имеющих зазоры. В этом же направлении действует и заднее натяжение полосы.

© Николаев В.А., Жученко С.В., Васильев А.А., 2013 г.

Снижение осевых и радиальных нагрузок на подшипники предполагает иная схема расположения рабочих валков относительно осей опорных валков (рис. 1). В этом комплекте верхний и нижний рабочие валки смещены в разных направлениях относительно оси опорных валков. Верхний рабочий валок смещен по направлению прокатки в четном проходе относительно верхнего опорного валка, а нижний рабочий валок смещен против направления прокатки относительно нижнего опорного валка. Таким образом, в предлагаемом реверсивном стане в нечетном проходе, подобно клетям непрерывного стана, работает нижняя пара валков, а в четном проходе - верхняя пара валков. При этом суммарное относительное смещение рабочих валков составляет  $2e = 4-10$  мм и не превышает длину дуги контакта полосы с рабочими валками ( $e$  – смещение оси рабочего валка относительно опорного).

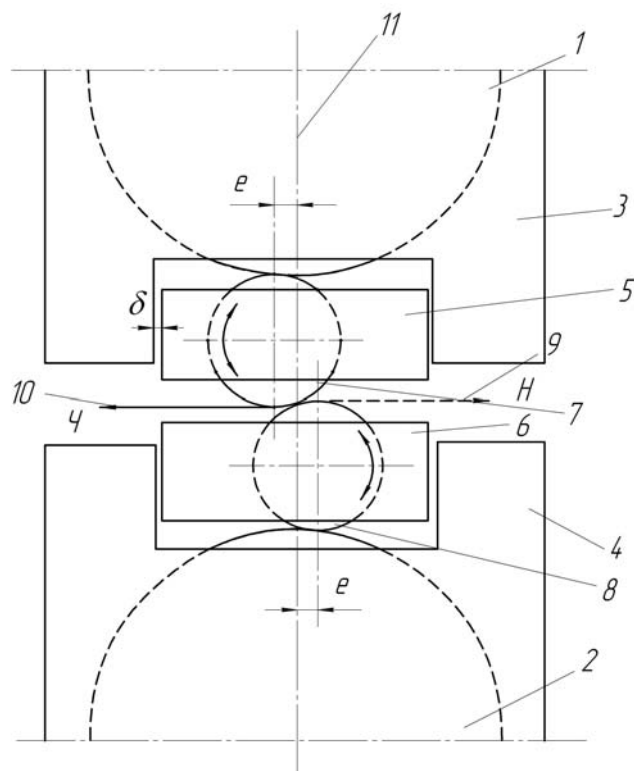
По сравнению с симметричным процессом прокатки на известном реверсивном стане ( $D_1 = D_2$ ) в предлагаемом стане со взаимным смещением рабочих валков возникает характерный несимметричный процесс с наклоном полосы на входе в очаг деформации и взаимное смещение верхней и нижней частей слоев металла в очаге деформации.

Взаимное смещение рабочих валков на величину  $2e$  обуславливает различие углов захвата  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  относительно их осей и, следовательно, различие горизонтальных составляющих  $v_{x1}$ , окружных скоростей в точках А и В (рис. 2).

Взаимное противоположное смещение валков в горизонтальной плоскости может быть применено на реверсивных станах для горячей прокатки листов и полос. При холодной прокатке на полосу действуют напряжения переднего и заднего натяжений, что в определенной степени нивелирует воздействие несимметрии деформации. На реверсивных станах горячей прокатки листов натяжение отсутствует, и для этого случая выполним анализ особенностей очага деформации.

На рис. 2 представлена схема очага деформации при горизонтальном смещении рабочих валков в противоположные стороны относительно оси 3 опорных валков. В связи с этим на нижнем и верхнем рабочих валках возникают различные условия деформации металла. Особенностью деформации металла при таком расположении валков является смещение точек поверхности валков с максимальным размером по вертикальной их оси. Для нижнего валка 1 это положение соответствует точке D. Следовательно, пластическая деформация полосы нижним валков происходит на дуге контакта BD. На участке DD' пластической деформации происходить не должно.

На верхнем валке 2 максимальный размер валка по вертикальной оси находится в точке N. Однако зазор NM между валками в этом сечении будет всегда больше, чем в некотором сечении на участках MD и NC. Очевидно, справедливым будет полагать, что основная пластическая деформация металла верхним валком заканчивается в точке С. Это предположение



**Рис. 1. Схема расположения рабочих валков в клетях кварто:** 1, 2 - опорные валки; 3, 4 - подушки опорных валков; 5, 6 - подушки рабочих валков; 7, 8 - рабочие валки; 9, 10 - полоса; 11 - ось опорных валков (H и Ч - нечетный и четный проход; d - зазор между подушками рабочих и опорных валков)

основано на том, что на участок CC' и DD' со стороны нижнего валка происходит увеличение зазора, а со стороны верхнего валка уменьшение зазора относительно средней горизонтальной линии, делящей зазор на две части. Поэтому на протяжении участков CC' и DD' зазор остается практически неизменным, отсутствует обжатие полосы, и происходит лишь калибровка полосы с уменьшением поперечной разнотолщинности. Таким образом, со стороны нижнего валка 1 обжатие полосы происходит на участке BD, а со стороны верхнего валка 2 – на участке AC. Различные величины обжатий и характер распределения нормальных контактных напряжений  $p_x$  (рис. 2). Последнее обусловлено направлением действия контактных нормальных  $p_i$  и касательных  $t_i$  напряжений на нижнем и верхнем валках.

Тормозящее действие горизонтальных составляющих  $p_{2x}$  и  $t_{2x}$  на участке CC' способствует уменьшению зоны опережения в пластическом очаге деформации, а направление действия напряжений  $p_{1x}$  и  $t_{1x}$  на участке DD' способствует увеличению зоны опережения в очаге деформации на валке 1. Однако результирующие величины опережений на валках будут определяться суммой действия всех параметров очага деформации. Этим определяется и направление изгиба переднего конца полосы, выходящего из валков.

Поскольку пластическая деформация практически заканчивается в плоскости CD, так как зазор между валками на участках CC' - DD' не изменяется, то, следовательно, в первом приближении для плоскости входа полосы в валки будем иметь некоторое разли-

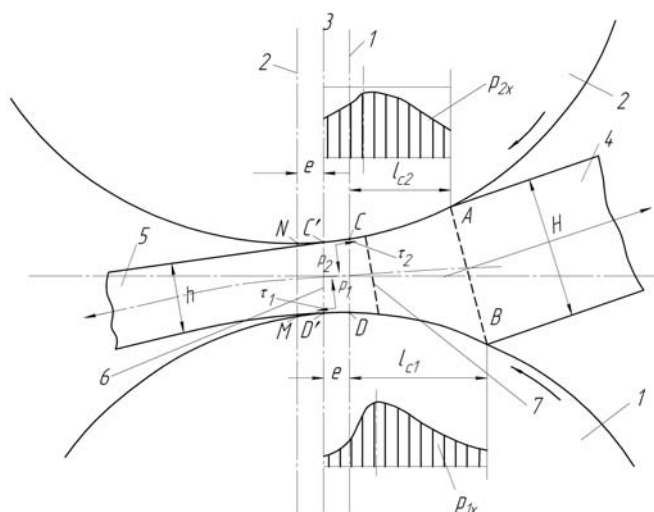


Рис. 2. Схема очага деформации при горизонтальном смещении рабочих валков: 1 - ось (нижний рабочий валок); 2 - ось (верхний рабочий валок); 3 - ось опорного валка; 4 - полоса до прокатки; 5 - полоса после прокатки; 6 - граница плоскости выхода полосы из валков; 7 - нейтральное (критическое) сечение

чие обжатий со стороны валков 1 и 2

$$2\Delta h_1 - 2\Delta h_2 = \delta_{II}, \quad (1)$$

где  $\delta_{II}$  - разница обжатий полосы между валками 1 и 2;  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  - величины обжатий на соответствующих валках.

Поскольку верхний валок смещен по ходу прокатки относительно нижнего рабочего валка, а разница в длинах дуг контакта равна величине «e» (рис. 2), очевидно, пропорциональна разница в обжатиях  $\delta_{II}$ . В этом случае, в соответствии с известным выражением, параметр  $\delta_{II}$  может быть определен из условия

$$\delta_{II} = e^2 / R, \text{ где } R - \text{ радиус валков.}$$

$$\text{Так как } \Delta h_2 = \Delta h - \Delta h_1,$$

$$\text{то } \Delta h_1 = \frac{\Delta h}{2} + \frac{\delta_{II}}{4}. \quad (2)$$

После определения основных параметров  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  представляется возможным выполнить расчет кинематических и силовых параметров с учетом различного действия контактных напряжений по длине очагов деформаций на валках 1 и 2.

Поскольку на участке  $CC'$  горизонтальная составляющая окружной скорости валка 2 продолжает увеличиваться, а на участке  $DD'$  уменьшаться, то следует полагать, что в данных условиях ведущим валком следует признать рабочий валок 2. В связи с этим валок 2 создает в слоях полосы со стороны валка 1 внутренние растягивающие напряжения, подобно переднему внешнему натяжению, а рабочий валок 1 в слоях полосы со стороны валка 2 создает растягивающие напряжения, подобно действию заднего внешнего натяжения [1-3]. С учетом этого запишем равновесие действующих сил со стороны каждого валка ( $B = 1$ ) ( $\cos \alpha \approx \cos \gamma = 1$ ;  $\sin \alpha \approx \alpha$ ;  $\sin \gamma \approx \gamma$ ):

валок 1

$$-p_1 \cdot R \frac{\alpha_1^2}{2} + p_1 \cdot f \cdot R \cdot \alpha_1 - 2p_1 \cdot f \cdot R \cdot \gamma_1 = -p_1 \cdot f \cdot e - \frac{\sigma_1}{2} h; \quad (3)$$

валок 2

$$-p_2 \cdot R \frac{\alpha_2^2}{2} + p_2 \cdot f \cdot R \cdot \alpha_2 - 2p_2 \cdot f \cdot R \cdot \gamma_2 = p_2 \cdot f \cdot e + \frac{\sigma_2}{2} H; \quad (4)$$

где  $p_i$  - средние контактные нормальные напряжения;  $\alpha_i$  - углы контакта, соответствующие дугам  $l_{ci}$ ;  $f$  - коэффициент трения;  $\gamma_i$  - угол критического сечения;  $\sigma_i$  - внутренние растягивающие напряжения;  $H$  и  $h$  - начальная и конечная толщины полосы.

После решения и преобразования уравнений (3) и (4) получим

валок 1

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_1}{2} \left(1 - \frac{\alpha_1}{2f}\right) + \frac{h}{2R} \left(\frac{e}{h} + \frac{\sigma_1}{2f \cdot p_1}\right); \quad (5)$$

валок 2

$$\gamma_2 = \frac{\alpha_2}{2} \left(1 - \frac{\alpha_2}{2f}\right) - \frac{H}{2R} \left(\frac{e}{H} + \frac{\sigma_2}{2f \cdot p_2}\right). \quad (6)$$

Первое слагаемое в выражениях (5) и (6) представляет угол критического сечения в симметричных условиях деформации ( $\gamma_{C1}$  и  $\gamma_{C2}$ ). Из выражений (5) и (6) имеем

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 - \gamma_{C1} &= \frac{\sigma_1 \cdot h}{2f \cdot R \cdot p_1} + \frac{e}{2R}; \\ \gamma_{C2} - \gamma_2 &= \frac{\sigma_2 \cdot H}{2f \cdot R \cdot p_2} + \frac{e}{2R}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Из этих выражений определим величины внутренних напряжений

$$\left. \begin{aligned} n_1 = \frac{\sigma_1}{p_1} &= \left[ (\gamma_1 - \gamma_{C1}) + \frac{e}{2R} \right] \cdot \frac{2f \cdot R}{h}; \\ n_2 = \frac{\sigma_2}{p_2} &= \left[ (\gamma_{C2} - \gamma_2) + \frac{e}{2R} \right] \cdot \frac{2f \cdot R}{H}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Эти выражения имеют структуру, соответствующую иным несимметричным процессам прокатки [1-3] ( $R$  - радиус валков).

Средние нормальные контактные напряжения на валках равны

$$p_{cp1} \approx p_{cp} (1 - n_1); \quad p_{cp2} \approx p_{cp} (1 - n_2), \quad (9)$$

где  $p_{cp}$  - среднее нормальное контактное напряжение при симметричной прокатке.

Среднее нормальное контактное напряжение в рассматриваемом случае равно

$$p_{cp.H} = p_{cp} \left(1 - \frac{n_1 + n_2}{2}\right). \quad (10)$$

Если  $e = 0$  (нет смещения валков), но существует некоторый несимметричный процесс прокатки, то выражения (8) приобретают известный вид [1-3]. Для решения этого выражения в численном виде необходимо предварительно рассчитать углы критического сечения, для чего необходимы дополнительные уравнения или следует разработать итерационный процесс расчета коэффициентов  $n_1$  и  $n_2$ , что является следующим шагом исследований. Здесь же пока-

жем на примере, близким к реальному процессу, степень влияния параметров на величины  $n_1$  и  $n_2$ . Расчет выполним для таких случаев:  $f = 0,05$ ;  $R = 400$  мм;  $h = 1,0$  мм;  $H = 1,4$  мм;  $(\gamma_1 - \gamma_{C1}) \approx (\gamma_{2C} - \gamma_2) = 0,001$ ;  $0,0015$ ;  $0,0022$ ;  $e = 2$ ;  $3$ ;  $4$  мм.

Как видно на рис. 3, увеличение различия углов критического сечения и величины смещения осей рабочих валков (в разумных пределах) приводит к повышению степени несимметричности процесса прокатки, повышению уровня внутренних продольных растягивающих напряжений, о чем свидетельствует увеличение коэффициентов  $n_1$  и  $n_2$ . При суммарном смещении рабочих валков на  $2e = 8$  мм (~32 % от длины дуги контакта  $l_c = 25,3$  мм) среднее значение коэффициента снижения среднего нормального контактного напряжения (СНКН).  $n_{cp} = 0,5 (n_1 + n_2)$  в зависимости от параметра  $Dg_1$  составляет  $0,161-0,214$  (16,1- 21,4 %). Увеличение радиуса валков и коэффициента трения способствует увеличению коэффициентов  $n_i$ . Этому же благоприятствует уменьшение толщины полосы.

**Выводы**

Получены теоретические зависимости, устанавливающие связь между горизонтальным смещением осей рабочих валков относительно оси опорных валков в разных направлениях и кинематическими параметрами деформации полосы. Дана количественная оценка влияния степени несимметрии процесса прокатки на интенсивность снижения средних нормальных контактных напряжений. Прогнозируемое снижение СНКН составляет 10-20 %. Кроме того, анализ очага деформации показал возможность возникновения на выходе из валков участка, в котором происходит калибровка высотных размеров полосы.

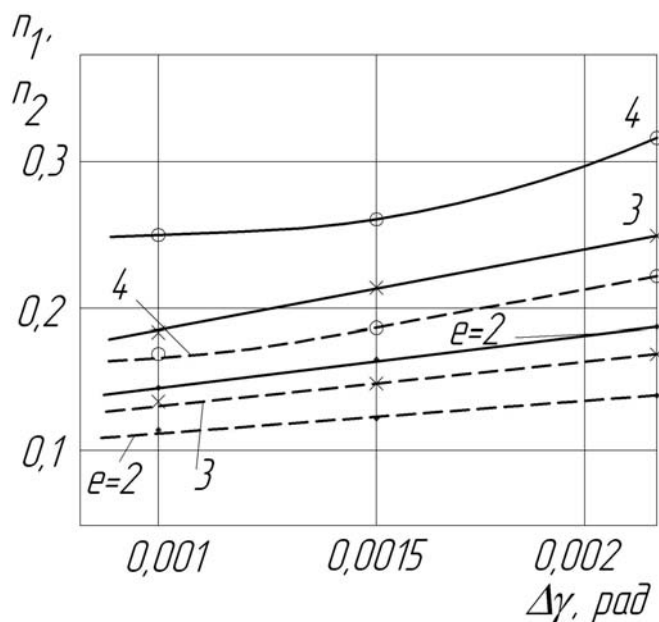


Рис. 3. Влияние разницы углов критических сечений на величины коэффициентов  $n_i$  (—  $n_1$ ; ----  $n_2$ );  $n_1$  и  $n_2$  – коэффициенты снижения среднего нормального контактного напряжения соответственно со стороны валков 1 и 2;  $e$  – величина смещения осей рабочих валков относительно оси опорных валков

**Библиографический список**

1. Теория и технология несимметричной прокатки / В.А. Николаев, В.Л. Мазур, А.К. Голубченко, Е.В. Бинкевич- М.: Агентство «Информарт», 1996. – 262 с.
2. Николаев В.А. Теория и практика процессов прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 2002. – 232 с.
3. Николаев В.А. Теория прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 228 с.

Поступила 03.09 2012

**К 100-летию со дня рождения О. А. Пляцковского (1913 - 1996)**

Оскар Александрович Пляцковский родился 20 февраля 1913 г. в Днепропетровске в семье рабочего. После окончания ДМЕТИ в 1937 г. он работает на Южнотрубном заводе (Никополь), в 1938–1939 гг. – начальником смены цеха бесшовных труб трубопрокатного завода им. В.И. Ленина (Днепропетровск), с 1939 по июль 1941 г. – старшим инженером лаборатории горячей прокатки труб.

С июля 1941 г. О.А. Пляцковский служит в рядах Советской Армии. Закончил войну в звании капитана, награжден орденами и медалями. После демобилизации из Советской Армии в 1946 г. О.А. Пляцковский работает старшим научным сотрудником, руководителем группы, заведующим лабораторией 1958–1990 ВНИТИ. В 1948 г. без отрыва от работы он защитил кандидатскую, а в 1963 г. докторскую диссертации. В 1969 г. ему присвоено ученое звание профессора.

Коллектив лаборатории, возглавляемой О.А. Пляцковским, разрабатывал технологические процессы производства труб на агрегатах с пилигримовыми и трехвалковыми раскатными станами. В эти годы сложилась научная школа ученых и специалистов трубного производства, руководимая О.А. Пляцковским. Им лично и в соавторстве опубликовано около 300 научных работ, в том числе 79 изобретений. Под его научным руководством защищена 21 кандидатская и одна докторская диссертации. По технологическим заданиям ВНИТИ были введены в эксплуатацию ТПА 200 с трехвалковым раскатным станом (1962 г.) на НТЗ и три ТПА с пилигримовыми станами: 4-6” на Таганрогском МЗ (1967 г.), 5-12” на НТЗ (1968 г.) и Северском ТЗ (1976 г.).

Ему была присуждена премия Совета Министров СССР. О.А. Пляцковский пользовался заслуженным уважением коллег в научной среде, а также специалистов предприятий. Его отличали аналитический ум, широта научных интересов, принципиальность, интеллигентность, уважительное отношение к людям.

Мы помним!!!

Группа товарищей, сотрудники **А.И. Козловский**, А.Ф. Гринев, В.П. Сокуренько, Б.Г. Павловский, А.А. Чернявский, Г.П. Блощинский, Ю.Д. Угрюмов, А.В. Чуев