

ИЗМЕРЕНИЕ УСИЛИЙ ПРОКАТКИ НА ТОЛСТОЛИСТОВЫХ СТАНАХ

В настоящее время для измерения усилий прокатки используются тензометрические устройства двух типов: во-первых, тензометрические стержни, воспринимающие упругую деформацию станин, величина которой пропорциональна усилию прокатки; во-вторых, силомеры (мессдозы), устанавливаемые под нажимные винты и непосредственно воспринимающие реакции усилия прокатки. Несмотря на многократные случаи применения тех и других силоизмерительных устройств при исследовательских работах [1, 2, 3], они все еще не получили распространения в качестве постоянно действующих приборов. В данной статье сравнивается работа силоизмерительных устройств первого и второго типа на основе опыта их применения на листовых станах Ашинского металлургического завода и Нижне-Тагильского металлургического комбината (НТМК).

Усилия прокатки на стане 2850 Ашинского завода измерялись тензометрическим стержнем, который изображен на рис. 1. Так как упругие деформации правой и левой стоек станин могут быть неодинаковыми, тензометрические стержни были установлены на обе стойки станин и показания их суммировались. Воспринимающая часть тензометрического стержня выполнена в виде короткого рабочего элемента с головками для закрепления его в брусках, концы которых привариваются к стойке станины. На боковую поверхность рабочего элемента наклеиваются четыре проводочные датчика — два вдоль оси стержня и два вдоль его окружности, соединенные в схему моста. Для защиты от масла и воды на датчики нанесено хлорвиниловое покрытие.

Обозначив через Δx удлинение станины на участке $x = L + l$, равном расстоянию между точками прикрепления брусков к стойке, имеем

$$\Delta x = n \cdot \Delta L + \Delta l, \quad (1)$$

где ΔL — удлинение брусков, суммарная длина которых между точками прикрепления равна L ;

n — множитель, учитывающий дополнительное удлинение брусков вследствие наличия сварных швов и захватов, упругая деформация которых не поддается точному расчету;

Δl — удлинение рабочего элемента, длина которого (без головок) равна l .

Относительные деформации брусков и рабочего элемента, согласно закону Гука, находятся между собой в следующем соотношении:

$$\frac{\Delta L}{L} : \frac{\Delta l}{l} = \frac{f}{F}, \quad (2)$$

где f — поперечное сечение рабочего элемента, мм^2 ;
 F — поперечное сечение бруса, мм^2 .

Решая совместно уравнения (1) и (2), находим коэффициент механического усиления

$$K_m = \frac{\Delta l}{l} : \frac{\Delta x}{x} = \frac{1 + \frac{L}{l}}{1 + \frac{nL}{l} \cdot \frac{f}{F}} \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что для получения наибольшего усиления длина рабочего элемента должна быть мала в сравнении с длиной брусьев, а его поперечное сечение относительно поперечного сечения брусьев должно быть небольшим. Множитель n определяется опытным путем.

Конструкция тензометрического стержня (см. рис. 1) имеет следующие расчетные параметры: $L=1424$ мм, $l=50$ мм, $F=6000$ мм^2 , $f=88$ мм^2 . Подставляя эти исходные данные (при $n=1$) в уравнение (3), находим, что коэффициент механического усиления составляет при указанных выше условиях

$$K_m = \frac{1 + \frac{L}{l}}{1 + \frac{nL}{l} \cdot \frac{f}{F}} = \frac{1 + \frac{1424}{50}}{1 + \frac{1 \cdot 1424}{50} \cdot \frac{88}{6000}} = 21.$$

Удлинение стойки станины на участке, равном расстоянию между точками прикрепления брусьев к стойке, измеряли, поместив между концами брусьев вместо рабочего элемента индикатор часового типа. Для большинства пропусков индикатор показывал удлинение этого участка стойки около 0,04 мм, что соответствовало примерно 4,5 мв выходного напряжения мостика силоизмерителя. Из тарировочной характеристики рабочего элемента было установлено, что такому небалансу мостика соответствует усилие растяжения 1050 кг, при котором рабочий элемент удлиняется на 0,027 мм. Упругое удлинение брусьев при усилии 1050 кг

$$\Delta L = \frac{P}{F \cdot E} = \frac{1050}{6000 \cdot 22000} = 0,011 \text{ мм.}$$

Подставляя найденные значения Δx , Δl и ΔL в уравнение (1), находим

$$n = \frac{\Delta x - \Delta l}{\Delta L} = \frac{0,040 - 0,027}{0,011} \cong 1,2.$$

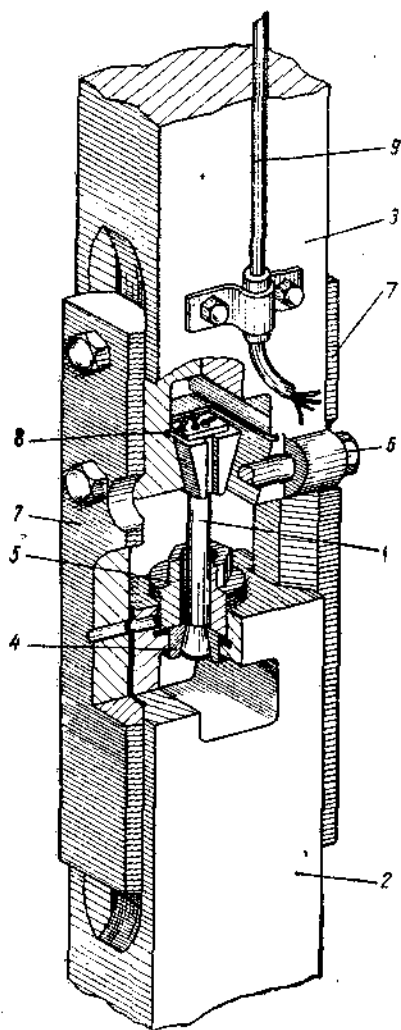


Рис. 1. Тензометрический стержень:
 1 — трубчатый рабочий элемент; 2 и 3 — брусья, концы которых приварены к станине; 4 — разрезное кольцо; 5 — натяжная гайка; 6 — стяжной болт; 7 — направляющие планки; 8 — панель; 9 — токопроводящий кабель.

При подстановке найденного значения n в уравнение (3) коэффициент усиления для рассмотренного выше примера получается равным 20. Отсюда видно, что величина n при правильном выборе отношений $\frac{L}{l}$ и $\frac{f}{F}$ оказывает незначительное влияние на коэффициент механического усиления.

Двадцатикратное механическое усиление, обеспечиваемое конструкцией силоизмерительного стержня, позволяет осциллографировать усилия прокатки без применения электронного усилителя, а для постоянной регистрации в производственных условиях использовать быстродействующий электронный потенциометр.

Электрическая измерительная схема тензометрического стержня с регистрацией усилий прокатки при помощи быстродействующего электронного потенциометра изображена на рис. 2. Тензометрические стержни питаются постоянным током от отдельных источников питания, что вызвано необходимостью суммирования показаний обоих стержней [4]. Суммирование производится по напряжению. Цепочка сопротивлений $R_1 - R_2 - R_1$ служит

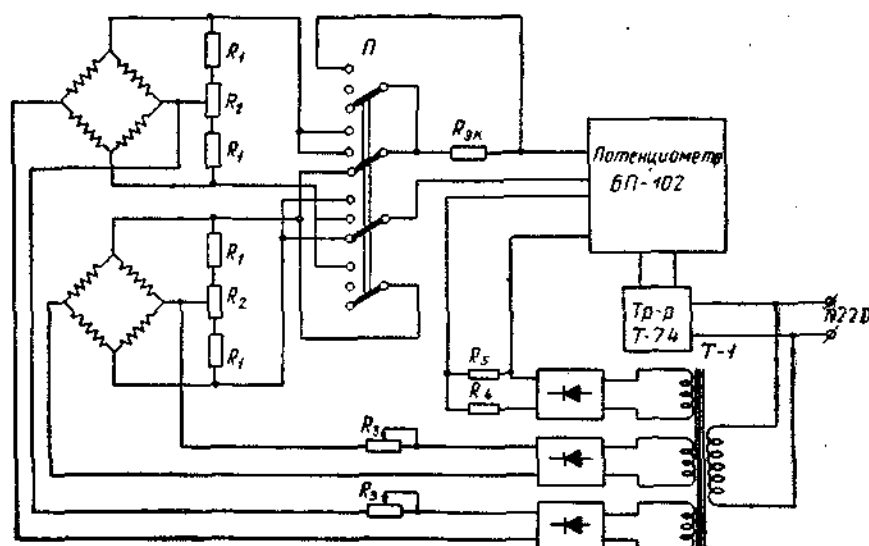


Рис. 2. Электрическая схема измерения усилия при прокатке.

для балансировки мостиков. Переключатель P переключает быстродействующий потенциометр с регистрации суммы показаний обоих тензометрических стержней на регистрацию их показаний отдельно. Чтобы при переключениях не менялась цена деления регистрирующего прибора, в схему введено сопротивление R_{3k} , которое шунтируется накоротко при переключении на сумму. По величине сопротивления R_{3k} равно сопротивлению измерительной диагонали моста. Суммирование возможно только в случае равенства чувствительностей обоих стержней [4]. Так как стержни обладают линейными характеристиками, их чувствительность легко уравнивать путем изменения питающего напряжения при помощи сопротивлений R_3 . Питание измерительной схемы потенциометра осуществляется не от сухого элемента, а от специального выпрямителя, питаемого от отдельной обмотки общего трансформатора питания $T-1$. Если передаточные функции цепей питания измерительной схемы потенциометра и питания силоизмерителей одинаковы, то изменения напряжения сети не влияют на показания прибора и поэтому необходимость стабилизации напряжения

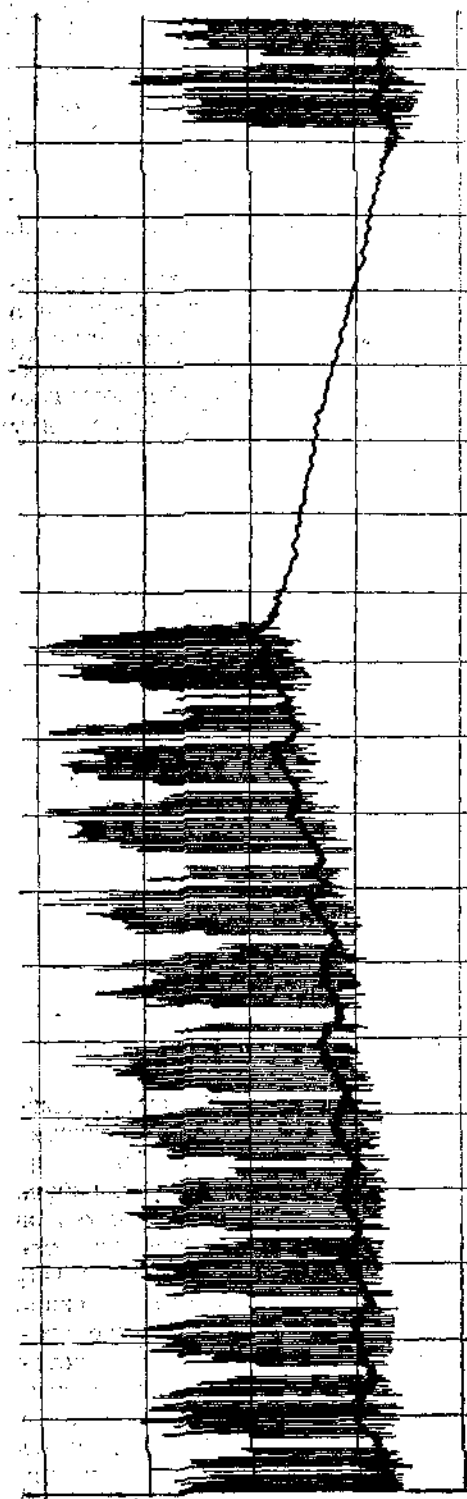


Рис. 3. Завись усилий прокатки на потенциометр БП-102 при прокатке листа 8X1500 на толстолистовом стане трио Ашкиского металлургического завода (АМЗ). (Каждая группа линий соответствует прокатке одного сляка).

питания схемы отпадает. Для достижения этого условия блоки питания стержней и измерительной схемы потенциометра изготовляются одинаковыми и на равные нагрузки (см. рис. 2). При этом сопротивления R_4 и R_5 должны быть выбраны такими, чтобы

$$R_4 + R_5 \cong R_3 + R_n,$$

где R_n — сопротивление питающей диагонали моста стержня, а дроссели в схемах фильтра поставлены в ненасыщенный режим работы. Сопротивление R_5 выбирается из условия получения необходимых пределов измерения потенциометра.

Тарировка тензометрических стержней в клети производилась с помощью гидравлического домкрата, который устанавливался вместо предохранительного стакана под нажимной винт. На стенке домкрата крепились маленький насос высокого давления и прецизионный манометр, при помощи которого измерялось усилие, растягивающее стойку станнины.

Исследование работы тензометрических стержней в производственных условиях показало, что по сравнению с силомерами, устанавливаемыми под нажимные винты, стержни, независимо от их конструктивного оформления¹, имеют следующие преимущества:

а) правила эксплуатации стана не нарушаются, так как сохраняются предохранительные стаканы под нажимными винтами;

б) отсутствует опасность возникновения поперечной разнотолщинности листов, которая может иметь место в случае применения силомеров;

¹ Изображенная на рис. 1 конструкция неудачна тем, что у нее отсутствует шарнирное звено, позволяющее правильно натягивать рабочий элемент, независимо от перекосов, возможных во время приварки брусьев.

в) эксплуатационные расходы минимальны, так как установленные тензометрические стержни не требуют иного ухода, кроме периодической проверки натяжения рабочих элементов.

Перечисленные преимущества тензометрических стержней неоднократно привлекали внимание исследователей [1, 3]. Однако ни один из предложенных тензометрических стержней не получил применения на производстве в качестве постоянно действующего прибора. Как показали наши исследования, это объясняется следующими принципиальными недостатками тензометрических стержней в случае применения их на толстолистовых станах:

а) неустойчивым положением нуля во времени вследствие температурных деформаций станин;

б) ошибочными показаниями под действием осевых усилий прокатки.

На рис. 3 приведена запись усилий прокатки на потенциометр БП-102 в период тринадцатиминутного простоя стана из-за неисправности рольганга. В это время внутренние поверхности станин перестали получать тепло, излучаемое прокатываемым металлом, в результате чего станины, ранее изогнутые наружу под воздействием температурной деформации, начали выпрямляться, растягивая при этом тензометрические стержни. Это вызывает смещение нуля в ту же сторону, как и под воздействием усилия прокатки. После окончания простоя нуль, как видно на рис. 3, постепенно возвращается в прежнее положение¹. Смещения нуля, связанные с изменениями температуры станин, получаются по величине того же порядка, что и отклонения под воздействием усилия прокатки. Автоматическая стабилизация нуля принципиально возможна, но нежелательна, так как сильно усложнит электрическую схему. Это обстоятельство делает тензометрические стержни мало пригодными для применения в схемах автоматического контроля и управления режимами обжатий.

Вызванное температурной деформацией станин смещение нуля имеет место и на протяжении прокатки одного слитка. В начале прокатки, пока машинное время составляет небольшую часть от общей длительности пропуска, происходит остывание внутренней стороны станин и нуль смещается вправо — в сторону отклонения под действием усилия прокатки. К концу прокатки машинное время значительно возрастает (в 10 и более раз), внутренние стороны станин разогреваются и нуль возвращается в исходное состояние. Вследствие этого нулевая линия получается волнистой (см. рис. 3).

В случае перекоса валков в горизонтальной плоскости они смещаются во время прокатки в осевом направлении, оказывая давление на станины. Под действием этой нагрузки станины изгибаются таким образом, что стержни получают дополнительные растяжения. Как показано на участке осциллограммы, изображенном на рис. 4, ошибочные показания тензометрических стержней под действием осевых усилий появляются не сразу, а после смещения валков в осевом направлении. В рассматриваемом случае перекося их был таков, что при прокатке металла между нижним и средним валками последний смещался в сторону коренной станины, вызывая очень большую ошибку показания тензометрического стержня, укрепленного на этой станине. Нижний валок смещался в противоположную сторону, оказывая на тензометрический стержень, прикрепленный к хвостовой станине, менее сильное воздействие, так как изгиб станины под действием низко расположенного нижнего валка значительно меньше, чем под действием среднего.

¹ Для того чтобы стержни всегда находились в натянутом состоянии, их необходимо натягивать при горячих станинах, а не во время ремонта стана.

Для измерения усилий прокатки на толстолистовом стане 3500 НТМК использованы силомеры с проволочными датчиками, установленные под оба нажимных винта. Конструкция силомера показана на рис. 5.

Проволочные датчики наклеиваются на внутреннюю стенку силомера — восемь штук вертикально и восемь — горизонтально. Чтобы иметь возможность регистрировать одновременно усилия прокатки осциллографом

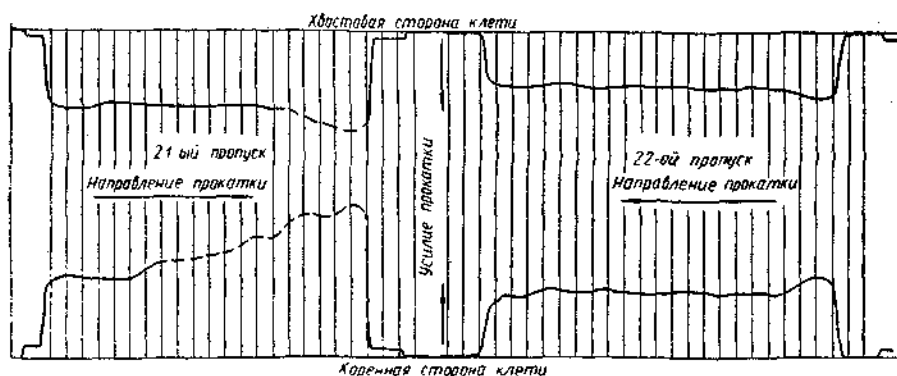


Рис. 4. Осциллограмма усилий прокатки. Ошибочные показания отмечены пунктирной линией.

и быстродействующим автоматическим потенциометром, в каждом силомере собираются две полных автономных схемы моста. Один из мостов может быть использован также для подачи импульса в систему автоматики. Чтобы уменьшить погрешности, связанные с эксцентричным приложением

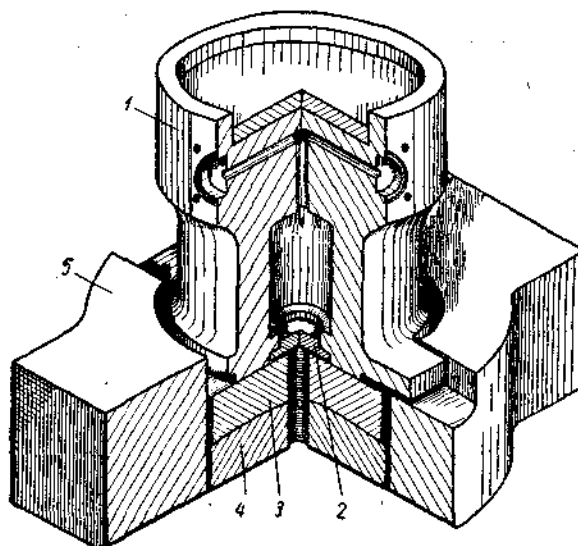


Рис. 5. Синомер, применявшийся при исследовании стана 3500 НТМК:

1 — корпус силомера; 2 — уплотнительная крышка; 3 — шаровая опора; 4 — подпятник шаровой опоры; 5 — обойма.

усилия прокатки, каждое плечо моста составлено из двух последовательно соединенных датчиков, расположенных один против другого на внутренней поверхности корпуса силомера. Кроме того, корпус силомера опирается на шаровую опору, который позволяет силомеру принимать правильное положение, несмотря на перекося подушки верхнего вала.

Благодаря такому способу расположения датчиков и включению их в схему моста достигается также хорошая температурная компенсация и практически исключаются термотоки. Как видно из рис. 6, и во время работы, и во время простоя стана смещение нуля практически отсутствовало, хотя температура силомеров в момент прекращения прокатки была около 70° .

Электрическая схема питания и балансировки силомеров применялась такая же, как и в случае тензометрических стержней (см. рис. 2). Как уже указано, для суммирования показаний силомеров по этой схеме они должны обладать линейными характеристиками. Вопрос обеспечения линейности характеристик силомеров потребовал специального изучения.

В результате опытов установлено, что для получения линейной характеристики высота стенки корпуса силомера должна быть в 3 раза больше ее толщины, а длина наклеиваемых датчиков занимать не более $2/3$ высоты стенки. Кроме того, необходимо, чтобы равнодействующая давления, воспринимаемая нижней опорной поверхностью корпуса силомера, проходила по середине стенки, во избежание дополнительных сжимающих или растягивающих напряжений на поверхности, куда наклеивают датчики. Как показано на рис. 7, присутствие преднамеренно вызванных дополнительных напряжений оказывает большое влияние на форму и положение тарировочных кривых. Такие же дополнительные напряжения могут появляться и при эксплуатации силомера в том случае, когда он соприкасается с опорной плитой не всей поверхностью, а ее внутренней или наружной частью (кривые *a* и *b* на рис. 7).

Исследования показали, что линейность характеристики силомера можно получить: во-первых, путем тщательной подгонки всех опорных поверхностей и при условии, что изгиб опорной плиты под воздействием усилия прокатки исключается;

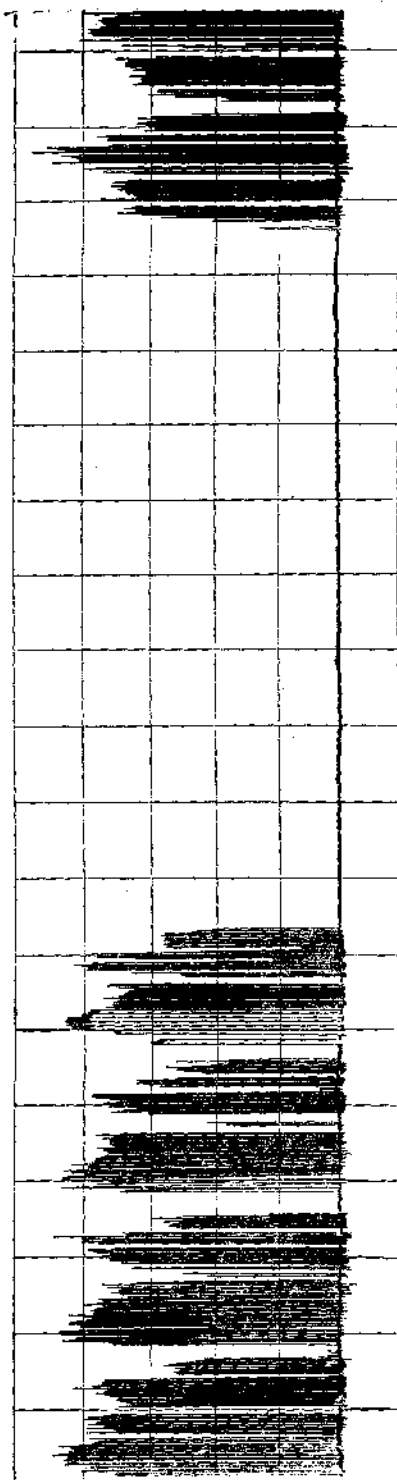


Рис. 6. Запись усилий прокатки на потенциометр БП-102 на толстолистовом стане 3500 НТМК. Простой стана около 18 мин. (Каждая группа линий соответствует прокатке одного слитка).

во-вторых, путем наклейки датчиков на внутреннюю и наружную стенки силомера [5].

Во втором случае влияние контактных условий значительно снижается, но становится сложной защита датчиков от механических повреждений и вредного влияния влаги, масла и т. п.

На толстолистовых станах подушки верхних валков почти всегда имеют большие зазоры относительно направляющих станин, в которых они перемещаются. Такие зазоры приводят к неизбежному перекосу подушек во время прокатки. Поэтому, во избежание эксцентричного приложения нагрузки, между силомером и подушкой необходимо помещать шаровую опору только правильной конструкции.

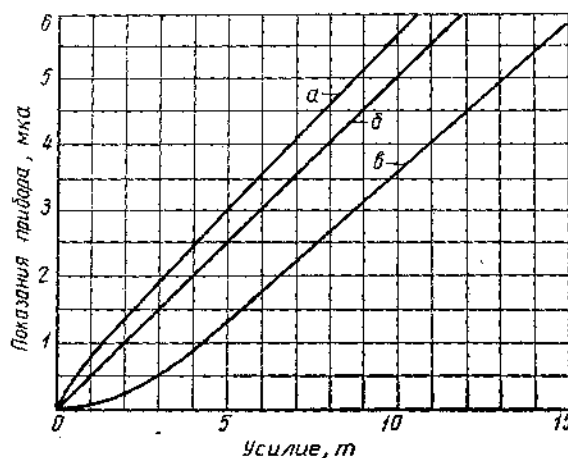
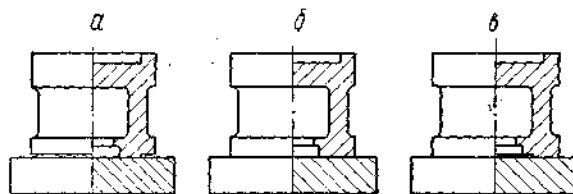


Рис. 7. Влияние на форму и положение тарировочных кривых силомера дополнительных напряжений в его стенках:

- а) силомер соприкасается с опорной плитой внутренней частью;
- б) силомер плотно прилегает к опорной плите;
- в) силомер соприкасается с опорной плитой наружной частью.

Если шаровая опора установлена так, как показано на рис. 8, а, то при повороте подушки усилие прокатки разлагается в шаровой опоре на нормальную и касательную силы. Линия действия нормальной силы не совпадает с осью силомера. Касательная сила действует на станины по линии прокатки, вызывая их изгиб, который не предусмотрен конструкцией клетки. Кроме того, в результате смещения верхнего вала при повороте подушки на угол φ раствор между валками увеличивается на

$$\Delta S = \frac{a}{2} \varphi^2; \quad (4)$$

где $\varphi \cong \frac{b}{a}$; a — расстояние от центра верхнего вала до центра кривизны

шаровой опоры; b — зазор, равный разности ширины проема и ширины верхней подушки. Если увеличение раствора между валками с левой и правой сторон окажется неодинаковым, то может возникнуть серпение листов тонкого сортамента.

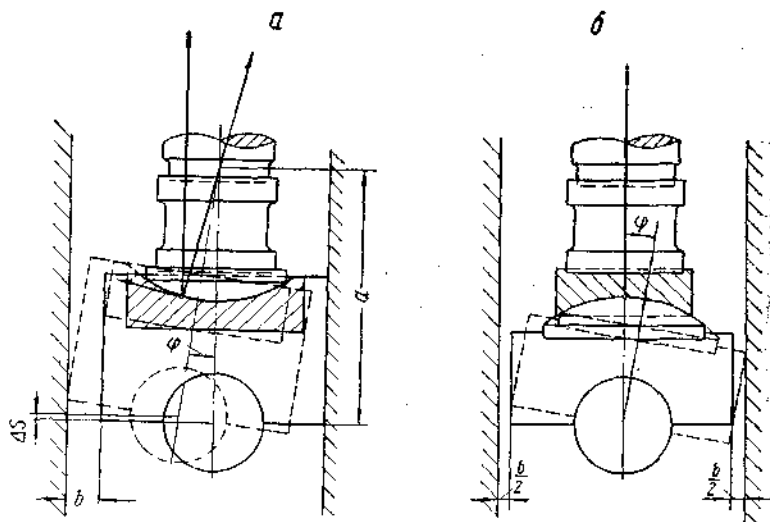


Рис. 8. Применение шаровых опор:
 a — неправильное; b — правильное.

Шаровая опора, установленная как показано на рис. 8,б и имеющая центр кривизны на оси верхнего валка, лишена этих недостатков. Усилие прокатки здесь всегда направлено вдоль оси силомера и отсутствует изменение раствора, несмотря на поворот подушки.

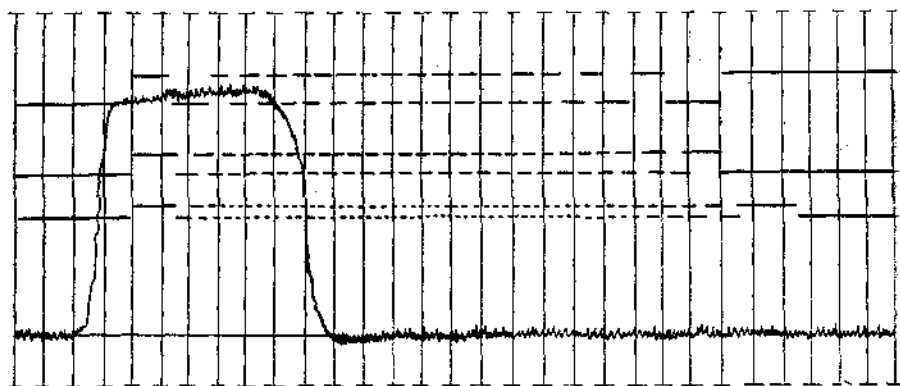


Рис. 9. Осциллограмма первых пропусков, полученная при исследовании стана 3500 НТМК.

Весьма серьезным вопросом, встречающимся в практике измерения усилий прокатки на толстолистовых станах, является предохранение силомера от вращения, которое наблюдается в основном в первых пропусках. Это вызывается тем, что в первых пропусках операторы, стремясь сократить время паузы между пропусками, задают металл в валки при еще

вращающихся нажимных винтах. В результате создается значительный вращающий момент, который стремится повернуть силомер. На рис. 9 показана подобная осциллограмма, на которой давление металла на валки зарегистрировано в виде трапеции, а перемещение нажимных винтов представлено тремя разрядами двоичного кода числа.

Как показала практика, силомер может быть надежно закреплен при помощи трефового соединения его с укрепленной на верхней подушке специальной рамой (см. рис. 5).

Силомеры, установленные на толстолистовом стане НТМК, находились в эксплуатации более трех месяцев. Однако вопрос стабильности во времени клеевого соединения проволочных датчиков с корпусом силомера требует еще изучения. Возможно, что для увеличения стабильности характеристик во времени следует от силомеров с наклеенными датчиками переходить к силомерам с намотанными проволочными датчиками [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Зайков, В. С. Целуйков, В. М. Пермяков. Рационализация режима обжатий среднелистового стана на основе автоматической регистрации усилий прокатки. Тр. конференции «Технический прогресс в технологии прокатного производства». Свердловск, Metallurgizdat, 1960.
2. И. М. Меерович. Конструирование и эксплуатация приборов для измерения давления на валки. Тр. НТО черной металлургии, т. 23, в сб.: «Листопрокатное производство». М., Metallurgizdat, 1960.
3. Д. И. Пирязев. Исследование давления металла на валки и загруженности главных двигателей на толстолистовом стане 2800. Тр. конференции «Технический прогресс в технологии прокатного производства». Свердловск, Metallurgizdat, 1960.
4. Д. И. Суяров, Л. Г. Чубриков. Электрическое суммирование показаний мессдоз с проволочными датчиками сопротивления. Бюлл. ЦИИИ черной металлургии, № 21, 1959.
5. А. Е. Гуревич, Е. С. Рокотян. Методы исследования прокатных станов. М., Metallurgizdat, 1957.
6. А. Б. Челюсткин. Автоматическое дозирование порошковых материалов. Бюлл. ЦИИИ черной металлургии, № 8, 1960.