

Металлографическая оценка качества металла показала, что степень развития дефектов «Осевая рыхлость» и «Осевая химическая неоднородность» в слябе с обжатием оценивается баллом 1, а в заготовке без обжатия – баллом 1,5.

При сравнительном анализе структуры темплетов установлено, что расположение участков повышенной растравимости в осевой части темплетов различается. Так, на темплете из сляба, отлитого без обжатия, данные участки находятся на 1,6% ниже геометрической середины заготовки по толщине, то есть наблюдается так называемая «нижняя» асимметрия сляба. Такая структура традиционна и характерна для непрерывнолитых заготовок, отлитых на криволинейных МНЛЗ. Формирование такой структуры происходит вследствие различия между скоростями продвижения фронтов кристаллизации навстречу друг другу из-за оседания равноосных кристаллов, образующихся по объемному механизму, на границу нижнего фронта. На темплете же из сляба, отлитого с мягким обжатием, участки растравимости располагаются на 2,8% выше середины заготовки – возникает «верхняя» асимметрия сляба. Аналогичная структура была обнаружена и на темплетах из слябов толщиной 300 мм плавок А, В и С (см. рис. 1 и 2).

Следовательно, в результате осуществления обжатия осевые рыхлость и химическая неоднородность перемещаются из нижней в верхнюю половину заготовки. Это может происходить из-за того, что при нажатии гидроцилиндрами сверху на сляб в жидкой части заготовки образуется гидродинамическое давление, направленное сверху вниз. В результате этого сквозь «лес» дендритов двухфазной зоны подпитка расплавом пор в нижней части двухфазной зоны, возникающих из-за усадки металла, происходит значительно эффективнее, чем в ее верхней части. Нижние

поры быстрее залечиваются, а дефекты усадочного происхождения образуются позже – после прекращения обжатия заготовки и находятся в вышерасположенных слоях металла.

Таким образом, мягкое обжатие на 1,8–2,0% по толщине слябовой непрерывнолитой заготовки из трубной стали на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком позволяет улучшить качество центральной части сляба вследствие уменьшения степени развития таких дефектов, как осевая рыхлость и осевая химическая неоднородность примерно на 0,5 балла. В результате мягкого обжатия заготовки изменяется строение осевой части сляба: участки расположения осевой рыхлости и осевой химической неоднородности перемещаются из-под геометрической оси заготовки и оказываются над ней, то есть происходит переход от «нижней» асимметрии при варианте разлива без обжатия к «верхней» асимметрии при использовании мягкого обжатия.

#### Список литературы

1. Мошкунев В.В., Столяров А.М., Казаков А.С. Определение длины лунки жидкого металла в непрерывнолитых слябах из трубной стали с использованием эффекта «искусственного раздутия» заготовки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. №1 (37). С. 24-26.
2. Мошкунев В.В., Столяров А.М., Казаков А.С. Снижение осевой химической неоднородности трубной стали в результате мягкого обжатия непрерывнолитого сляба // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. №2 (38). С. 24-25.

#### Bibliography

1. Moshkunov V.V., Stoliarov A.M., Kazakov A.S. Determination of the length to point of solidification in strands of Peritectic Low Alloyed steels for pipes with using «Mini whale» effect // Vestnik MGTU named after G.I. Nosov. 2012. №1 (37). С. 24-26.
2. Moshkunov V.V., Stoliarov A.M., Kazakov A.S. Longitudinal chemical inhomogeneity of continuously cast slab from tube steel improvements as a result of soft reduction. Vestnik MGTU named after G.I. Nosov. 2012. №2 (38). С. 24-25.

УДК 621.778.5:677.721

Харитонов В.А., Лаптева Т.А.

## РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПО СЕЧЕНИЮ ПРЯДИ ПРИ КРУГОВОМ ОБЖАТИИ

Предложена уточненная методика расчета передачи давления внутрь при малом пластическом обжатии многослойной пряди. Методика учитывает рост контактных площадок под действием тангенциальной составляющей давления.

**Ключевые слова:** проволока, прядь, малое пластическое обжатие, контактная поверхность, деформация.

There is a method for calculate of deformation around the strands procession radial squeezes. This method demonstrates the increase of the contact between the wires from influence tangential part of the presser.

**Keywords:** a wire, a strand, small plastic squeezing, a contact surface, deformation.

Повысить эксплуатационный ресурс стального каната возможно с помощью малого кругового пластического обжатия прядей, вследствие которого формируется межпроволочный полосовой контакт, снижающий рабочие напряжения [1-3]. Для определения величины межпроволочного контакта необходимо установить характер распределения деформаций между слоями пряди.

Глушко М.Ф., Скалацким В.К., Малиновским В.А. предложена методика расчета давлений (напряжений)

между проволоками пластически обжатой пряди [4], в которой для определения радиальной составляющей давления в любой проволоке введен коэффициент передачи радиального давления  $C_{ik}$  от  $k$ -й проволоки на  $i$ -ю. Расчет коэффициентов передачи давления ведется через угол  $\beta$ , находящийся между  $N_{ik}$  – нормалью к площадке смятия двух проволок и радиусом пряди, проведенным через ось проволоки  $i$  (рис. 1). При этом использовано допущение о пропорциональности давления между проволоками площадке их

взаимного смятия, но не учтено различие напряженного состояния проволок.

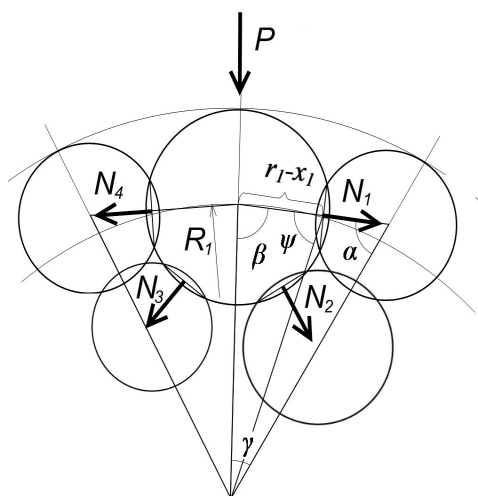


Рис. 1. Принципиальная схема определения давлений между проволоками

В настоящей работе предлагается уточненный расчет передачи давления внутрь пряди, включающий учет роста контактных площадок, в том числе и под действием тангенциальной составляющей давления, а также системы коэффициентов передачи давления, рассчитываемой не через угол  $\beta$ , а через угол наклона  $\psi$  (см. рис. 1) контактных площадок. Угол  $\psi$  образуется межцентровым отрезком контактирующих проволок и отрезком, соединяющим центр пряди с центром контактной площадки. Этот угол определяет для конкретной площадки контакта соотношение нормальной силы  $N_i$  и ее радиальной составляющей и рассчитывается по формуле

$$\psi = \arctan \left[ \frac{\sin(\alpha + \gamma) R_1}{\cos(\alpha + \gamma) R_1 + r_1 - x_1} \right], \quad (1)$$

где  $R_1$  – расстояние от центра пряди до центра проволоки;  $\gamma$  – угол между радиусами, проведенными из центра пряди к центрам контактирующих проволок;  $\alpha$  и  $\beta$  – углы между радиусами, проведенными из центра проволок к центру пряди и к центру контактной площадки соответственно;  $x_1$  – расстояние между площадкой контакта и вершиной дуги окружности проволоки радиусом  $r_1$  на нормали к площадке контакта;  $N_i$  – сила, нормальная к поверхности контакта.

Принятое допущение: проволоки деформируются без уменьшения площади поперечного сечения (деформация плоская) вследствие малого обжатия пряди, при котором длина площадки контакта на порядок меньше длины очага деформации. Длина каждой образуемой межпроволочной и поверхностной площадки контакта в пряди не пропорциональна прилагаемому к ней давлению.

Коэффициенты  $Ca_i$  и  $Cb_i$ , характеризующие изменение радиальных напряжений в проволоке до и после обжатия (формирования дополнительной контактной площадки у проволоки), соответственно определим из геометрических соображений по формуле (2).

В работе [5] приведена зависимость наклона площадки контакта от ее развитости, что определяет изменение угла  $\psi$  при обжатии пряди. Таким образом, коэффициент  $Ca_i$  будет различен при разных степенях обжатия даже без образования новых площадок контакта.

$$Ca_i = \frac{\sum_{i=1}^s \cos \psi_i}{\sum_{i=1}^s \cos \psi_i + \sum_{i=1}^s \sin \psi_i}; \quad (2)$$

$$Cb_i = \frac{\sum_{i=1}^s \cos \psi_i}{\sum_{i=1}^s \cos \psi_i + \sum_{i=1}^s \sin \psi_i},$$

где  $s$  – суммарное количество контактов  $i$ -й проволоки.

Введем коэффициенты реализации давления  $P_i$  в  $j$ -й проволоке  $C_{(i-j)}$  (от  $i$ -ой проволоки  $j$ -й проволоке). Принимаем, что в проволоке верхнего повива  $P_i = 100\% = 1$ . Нормальные контактные напряжения между проволоками в слоях до и после деформации рассчитаем через коэффициенты  $Ca_{(i-j)}$ ,  $Cb_{(i-j)}$ :

$$Ca_{(i-j)} = \frac{\cos \psi_i}{\sum_{i=1}^m \cos \psi_i}, \quad Cb_{(i-j)} = \frac{\cos \psi_i}{\sum_{i=1}^m \cos \psi_i}, \quad (3)$$

где  $m$  – количество нижележащих контактов  $i$ -й проволоки;  $\psi_i$  – угол контакта  $i$ -й проволоки с проволокой, воспринимающей давление.

Для учета особенности конструкции пряди введем коэффициент  $N_{(i-j)}$ , определяющий количество контактов между каждой проволокой  $j$ -го слоя с проволоками вышележащего  $i$ -го слоя.

С учетом коэффициентов  $Ca_i$ ,  $Cb_i$ ,  $C_{(i-j)}$  и  $N_{(i-j)}$  определяем давление  $P_j$  в  $j$ -й проволоке

$$P_j = \sum_{i=1}^{\kappa} P_i \cdot C_{ai} \cdot C_{a(i-j)} \cdot N_{(i-j)}, \quad (4)$$

где  $\kappa$  – количество верхних контактов  $j$ -й проволоки в данный момент.

Анализ расчетов показал сложную схему передачи давления в пряди, согласно которой протекают процессы:

1) передача внутрь давления, возрастающего с уменьшением количества проволок;

2) потеря части передаваемого вглубь пряди давления после образования боковых контактов между проволоками одного слоя. После формирования боковых контактов между проволоками одного слоя давление по боковому контакту передается только в тангенциальном направлении, что снижает радиальную составляющую передаваемого проволокой давления;

3) распределение давления в пряди, зависящее от количества контактов данной проволоки и доли передачи давления через конкретный контакт от вышележащей проволоки. Таким образом, могут формиро-

ваться локальные концентраторы давления, а при передаче образовываться неодинаковые по величине потоки давления от внешних слоев вглубь пряжи.

Давление уменьшается при передаче внутрь пряжи, но в центральной проволоке из-за накопления давления по слоям (передача от нескольких проволок внутреннего слоя к одной центральной проволоке) происходит резкое возрастание давления.

Из-за появления новых контактных площадок в процессе обжатия передаваемое давление в слое может не только уменьшаться, но и увеличиваться. При образовании дополнительных контактных площадок, в общем случае, передаваемое внутрь пряжи давление снижается.

Значительная асимметрия расположения контактов по контуру определяет неравномерность сжатия, что снижает усилие деформации. Увеличение количества контактов, в свою очередь, обуславливает рост шарового тензора, что увеличивает усилия, необходимые для деформации [6]. Учитывая приведенные факторы, вводим коэффициент  $P_{(i)СГН}$  увеличения потребного усилия деформации  $P_i$  из-за усложнения схемы главных напряжений и определяем его по формуле

$$P_{(i)СГН} = \frac{\sum_{i=1}^s \left( \frac{1}{\sin^2 \frac{\lambda_i}{2}} \right)}{s + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{s}}}, \quad (5)$$

где  $\bar{\lambda}$  – средняя величина углов;  $\lambda_i$ ,  $\lambda_j$  – центральный угол окружности проволоки, образованный отрезками, проведенными к центрам ее контактных площадок с двумя соседними проволоками (рис. 2).

Учет количества контактов определяется числителем, а асимметрия их расположения – знаменателем формулы (5). При наличии двух противоположных контактов  $P_{(i)СГН} = 1$ , что определяет схему напряжений как одноосную.

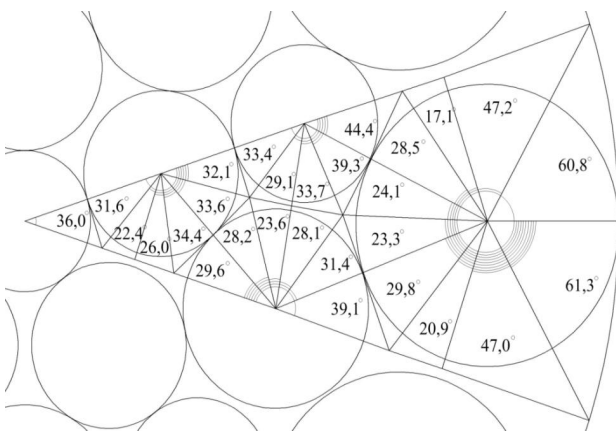


Рис. 2. Углы  $\lambda'$  и  $\lambda''$  в пряже конструкции 1+5+5/5+10, где  $\lambda = \lambda' + \lambda''$

Для учета влияния схемы напряжения на сопротивление деформации проволоки введем коэффициент приоритета  $P_{приор}$ , показывающий преимущественность протекания деформации в данной проволоке по отношению к другим проволокам в пряже, рассчитываемый по формуле

$$P_{приор} = \frac{P_i}{P_{(i)СГН}}. \quad (6)$$

В качестве примера определим приоритетность деформации проволок пряжи конструкции 1+5+5/5+10 (рис. 3) с диаметрами проволок по слоям, считая от внешнего: 1 слой – 1,70 мм; 2 слой – 0,95 мм; 3 слой – 1,20 мм; 4 слой – 1,00 мм; 5 слой – 0,85 мм. Выделение пяти слоев произведено по принципу удаленности центра каждой проволоки от центра пряжи.

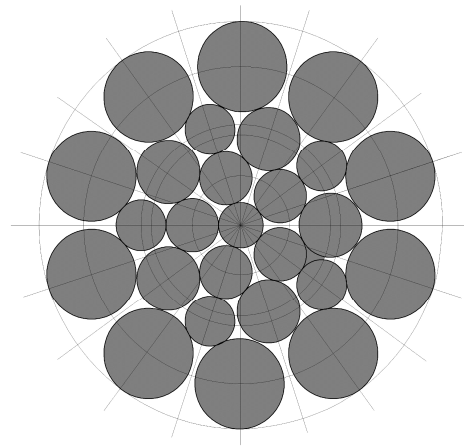


Рис. 3. Сечение пряжи конструкции 1+5+5/5+10 до обжатия

В общем случае принимаем условие последовательного формирования контактов от внешних проволок к внутренним, исходя из следующего:

1. Величина давления во внутренних слоях (кроме центральной проволоки, не имеющей боковых контактов), вследствие частичного перераспределения давления в тангенциальном направлении, снижается, а следовательно, снижается интенсивность деформации.

2. Схема напряженного состояния проволоки верхнего повива наиболее благоприятна для деформирования, т.к. величина интенсивности напряжения  $\sigma_i$  меньше из-за малого шарового тензора, определяемого, в частности, количеством контактов и неравномерностью их расположения по радиусу.

Расчетные значения коэффициентов  $Ca_i$  и  $Cb_i$  на начальной стадии развития  $i$ -го контакта представлены на рис. 4.

При формировании первого контакта во внешнем слое радиальная составляющая давления снижается с  $Ca_1=61,1\%$  до  $Cb_1=35,4\%$  (см. рис. 4).

Рассчитанные значения коэффициентов передачи  $C_{(i-j)}$  и коэффициентов  $N_{(i-j)}$  для исследуемой пряжи составили:  $Ca_{(1-2)}=0,485$ ;  $Ca_{(1-3)}=0,515$ ;  $Ca_{(2-4)}=1,000$ ;  $Ca_{(3-4)}=0,500$ ;  $Ca_{(4-5)}=1,000$ ;  $Cb_{(2-3)}=0,151$ ;  $Cb_{(2-4)}=0,698$ ;  $N_{(1-2)}=2$ ;  $N_{(1-3)}=2$ ;  $N_{(2-3)}=2$ ;  $N_{(2-4)}=1$ ;  $N_{(3-4)}=2$ ;  $N_{(4-5)}=5$ .

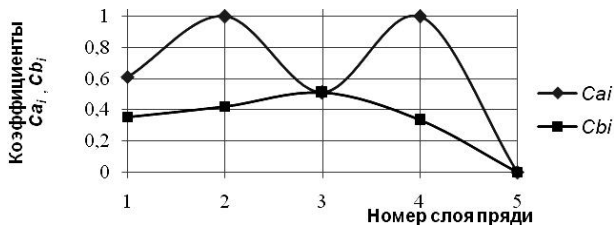


Рис. 4. Коэффициенты, определяющие радиальную долю давления в слоях пряди до ( $C_{ai}$ ) и после ( $C_{bi}$ ) образования дополнительных контактов

При условии последовательного формирования контактов для пряди конструкции  $1+5+5/5+10$  первый контакт будет формироваться между проволоками верхнего повива, второй – между проволоками второго и третьего слоя. Последний контакт образуется между проволоками внутреннего повива. Таким образом, по формуле (4) получаем схему распределения давлений  $P_j$  в проволоках пряди (рис. 5). До момента формирования контактов в слоях пряди в центральной проволоке согласно рис. 5 реализуется 45,7% прилагаемого извне усилия. Давление на центральную проволоку (5 слой) становится меньше только в процессе развития контактов между проволоками второго и третьего слоя (см. рис. 5). При образовании прочного свода проволок в слоях (арок) давление на центральную проволоку уменьшается в 8,8 раза по сравнению с подаваемым изначально до образования полосовых (арочных) контактов (см. рис. 5).

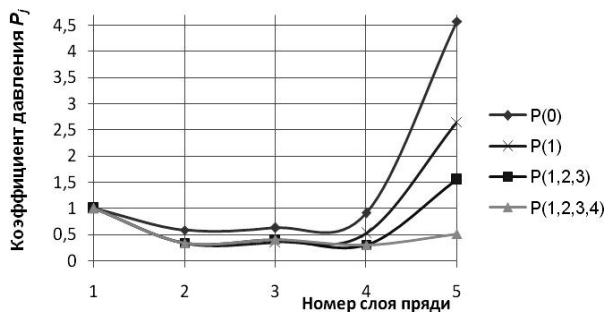


Рис. 5. Распределение давления  $P_j$  по слоям пряди при последовательном образовании контактов:  $P(0)$  – схема расчета напряжений в проволоках пряди до появления первого контакта;  $P(i, j)$  – после появления  $i$ -го и  $j$ -го контактов

С целью проверки методики произведено сравнение результатов расчетов с данными по распределению радиального давления, приведенными в работе [4], где рассчитаны коэффициенты передачи для пряди конструкции  $1+5+5/5$ . По условию задачи при линейном обжатии в  $n_n=8\%$  подразумевается наличие всех контактов, что соответствует случаю  $P(1,2,3,4)$  на рис. 5.

По условию расчета получим, что, с учетом данных из рис. 3, для пятого слоя  $C_5 = 5 \cdot 0,366 \cdot 0,499 \cdot 0,6 = 0,548$ . Аналогично для остальных слоев:  $C_4 = 0,499 \cdot 0,6 = 0,299$ ,  $C_3 = 0,547 \cdot 0,6 + 0,044 \cdot 0,272 = 0,340$  и  $C_2 = 0,453 \cdot 0,6 \times 0,499 \cdot 0,6 = 0,272$ .

В статье [4] приводятся обобщенные коэффици-

енты для всех прядей конструкции  $1+5+5/5$ , а для разрабатываемой методики приведено распределение давления только на начальной стадии развития контактов. Сравнение результатов расчетов показывает отклонение данных, полученных по разработанной методике, от данных работы [4] на 12%.

Для дальнейшего расчета определим геометрически величины углов  $\lambda'$  и  $\lambda''$  (см. рис. 2) и по формуле (5) найдем изменение коэффициента  $P_{(i)сгн}$  потребного усилия деформации (рис. 6).

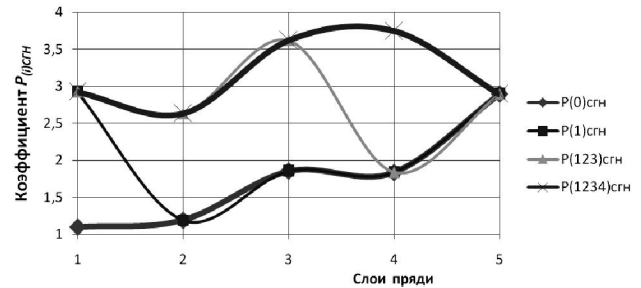


Рис. 6. Изменение  $P_{(i)сгн}$  потребного усилия деформации  $P_j$  при увеличении количества дополнительных контактов

Для проволок третьего и четвертого слоя при образовании шести контактов и их развитии, с учетом принимаемых коэффициентов, необходимые усилия деформации возрастают почти в четыре раза по сравнению с одноосным сжатием. Это приводит, несмотря на наличие высокого давления в проволоке, к снижению степени получаемой деформации. По формуле (6) для каждой проволоки определен коэффициент приоритета деформации, результаты расчета представлены на рис. 7.

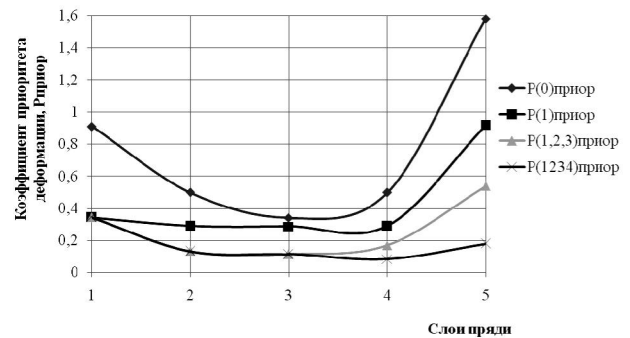


Рис. 7. Приоритетность протекания деформации по слоям пряди

Расчет показывает, что коэффициент давления  $P_j$ , а соответственно, и усилие деформации в центральной проволоке в 4,5 раза больше по сравнению с внешней проволокой (см. рис. 5), но степень получаемой деформации всего в 1,6 раза больше из-за менее благоприятной для деформации схемы напряжений ( $P(0)_{приор}$  на рис. 7).

Площадки контакта образуются во столько раз большие по ширине, во сколько больше коэффициент приоритетности  $P_{приор}$  у данной проволоки по отно-



шению к другой. Таким образом, деформация на первом этапе преимущественно осуществляется в центральной проволоке до заполнения межпроволочных зазоров и по графику ( $P(0)_{\text{приор}}$  на рис. 7) имеем, что центральная проволока интенсивно деформируется до образования первой арки ( $P(1)_{\text{приор}}$  на рис. 7), формируемой проволоками верхнего повива. Дальнейшее быстрое снижение приоритета деформации центральной проволоки соответствует падению напряжений, которые становятся недостаточными для продолжения роста контактных площадок.

Кроме центральной, на первом этапе достаточно интенсивно деформируются проволоки первого повива. После образования первой арки, с учетом прекращения интенсивной деформации в центральной проволоке из-за заполнения зазоров, деформация идет равномерно по всему сечению пряжи ( $P(1)_{\text{приор}}$  на рис. 7). После образования второй и третьей арки из-за несимметричности контактов и высоких давлений проволока верхнего повива снова становится наиболее приоритетной деформированию ( $P(1,2,3,4)_{\text{приор}}$  на рис. 7).

#### Выводы:

1. Уточнена методика расчета передачи давления внутрь пряжи при круговом пластическом обжатии, введена система коэффициентов, учитывающая рост контактных площадок под действием тангенциальной составляющей давления.

2. Получено распределение деформаций по сечению пряжи на разных этапах обжатия: до появления первой арки наиболее приоритетными деформированию являются проволоки внешнего повива и центральная проволока, после появления первой арки напряжения между проволоками внешнего и внутреннего повивов выравниваются, при появлении третьей и четвертой арок проволоки верхнего повива снова становятся наиболее приоритетными деформированию. Центральная проволока пряжи перенапря-

жена на всех этапах обжатия.

3. Применение предложенной методики позволит повысить качество конструирования прядей, подвергаемых пластическому обжатию, а также определить оптимальную величину обжатия пряжи конкретной конструкции.

#### Список литературы

1. Скалацкий В.К. Канаты из обжатых прядей // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 1. Киев: Техника, 1964. С. 152-158.
2. Исследование и разработка технологии изготовления нового вида продукции – стальных канатов с пластически обжатыми прядями в ОАО «Северсталь – метиз» / Трусов В.А., Капуткина Л.М., Силуянова Т.В., Филина Ю.С., Королев В.А. // Производство проката. 2011. № 10. С. 33-37.
3. Влияние пластического деформирования при волочении проволочных прядей в роликовой клети на механические свойства стальных канатов / Трусов В.А., Капуткина Л.М., Силуянова Т.В., Филина Ю.С., Королев В.А. // Производство проката. 2012. № 1. С. 41-44.
4. Глушко М.Ф., Скалацкий В.К., Малиновский В.А. Силовой анализ процесса кругового пластического обжатия прядей // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 9. Киев: Техника, 1972. С. 120-130.
5. Харитонов В.А., Лаптева Т.А. Методика определения контактных площадок при малом обжатии прядей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. №4. С. 66-67.
6. Глушко М.Ф., Малиновский В.А. Определение усилия волочения прядей // Стальные канаты: сб. науч. тр. Вып. 10. Киев: Техника, 1973. С. 65-73.

#### Bibliography

1. Skalatsky V.K. The ropes from the pressed strands // Steel ropes: the collection of proceedings. Release 1. Kiev: Technics. 1964. P. 152-158.
2. Cowards of Century A, Kaputkina L.M., Silujanova T.V., Filina J.S., Queens V.A. Investigation and working out the manufacturing techniques of a new kind production – steel ropes with plastically pressed strands in Open Society «Severstal – hardware» //hire Manufacture, 2011, № 10. P. 33-37.
3. Cowards of Century A, Kaputkina L.M., Silujanova T.V., Filina J.S., V.A. Vlijanie's The influence of plastic deformation at drawing the wire strands in a roller cage on mechanical properties of steel ropes. //hire Manufacture, 2012, № 1. P. 41-44.
4. Glushko M. F., Skalatsky Century K, Malinovsky V. A. The power analysis of process circular plastic squeezing of the strands //Steel ropes: the collection of proceedings. Release 9. Kiev: Technics. 1972. P. 120-130.
5. Haritonov V.A., Lapteva T.A. The method of definition the contact platforms at small pressed strands // News of HIGH SCHOOLS, 2012, № 4. P. 66-67.
6. Glushko M. F., Malinovsky V.A. The definition of effort the pressed strands // Steel ropes: the collection of proceedings. Release 10. Kiev: Technics. 1973. P. 65-73.