



*It is determined that maximal diameter of the wire at drawing through one and the same die corresponds to size of unit squeezing 0,5–1,0%.*

А. В. ДЕМИДОВ, РУП «БМЗ»

УДК 669.

## ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

### Явление расслоения анизотропной проволоки

Для армирования автомобильных шин широко используется высокопрочная холоднодеформированная проволока из высокоуглеродистой стали. Высокая прочность проволоки достигается за счет холодной пластической деформации – волочения с суммарными обжатиями порядка 85,3–92,2% для проволоки бортового кольца и 96,5–98,2% для проволоки металлокорда.

Основным фактором, ограничивающим суммарную вытяжку проволоки при волочении, является ухудшение прочностных свойств в условиях сложнонапряженного состояния. Сильнодеформированная проволока может обладать высоким сопротивлением к растяжению, но при этом преждевременно разрушаться, например, при изгибе и кручении. При сложных видах деформации могут присутствовать напряжения сдвига, ориентированные продольно по отношению к оси проволоки, т. е. в направлении ее минимального сопротивления касательным напряжениям. При достижении порога расслоения проволока способна преждевременно разрушиться уже при малых напряжениях / деформациях в условиях сложного напряженного состояния – изгиба, кручения.

Проволока для металлокорда испытывает сложные деформации непосредственно при переработке, на завершающей стадии изготовления – свивки. Склонность к расслоению проволоки металлокорда проявляется в виде повышенной тех-

нологической обрывности. Эксплуатационные характеристики проволоки для армирования бортов шин оценивают по сопротивлению как простым (растяжение), так и сложным (изгиб, скручивание) видам деформации.

Продольная трещина при скручивании проволоки образуется на начальном этапе кручения при углах сдвига на поверхности проволоки  $\alpha \approx 1-3^\circ$  к ее продольному направлению [1] (рис. 1).

При малых углах поворота ( $1^\circ < \alpha < 3^\circ$ ) направление продольных касательных напряжений  $\tau_{пр}$  практически совпадает с преимущественной ориентацией зерен – текстурой проволоки. В этом направлении сопротивление проволоки деформации сдвига минимально (проявление анизотропии), а нормальные напряжения растяжения – сжатия уравнивают друг друга. С увеличением угла поворота ( $\alpha \gg 3^\circ$ ) повышается доля сжимающих

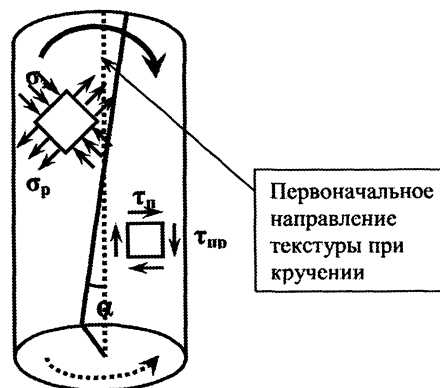


Рис 1. Схема напряженного состояния на поверхности проволоки при кручении

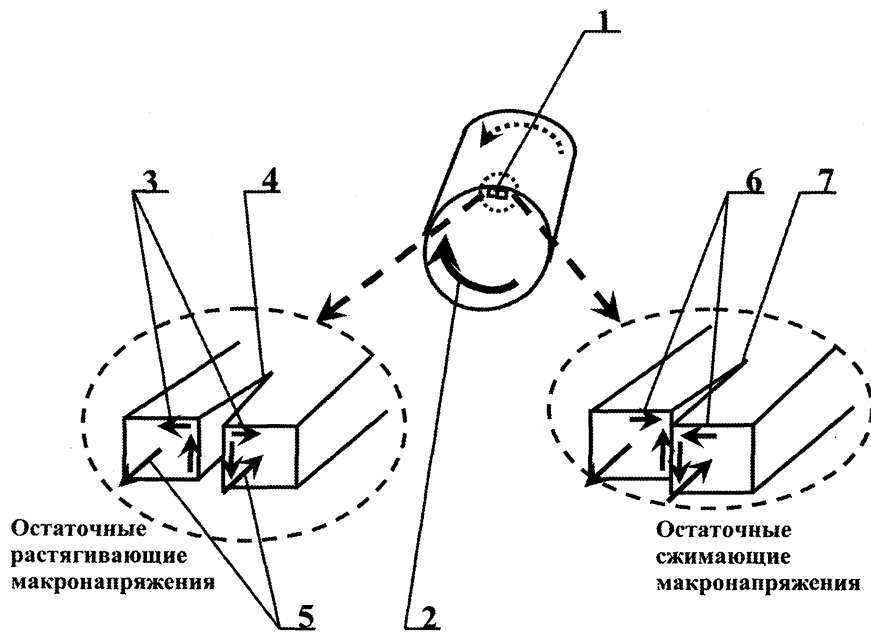


Рис 2. Образование расслоения под действием растягивающих напряжений на поверхности проволоки при кручении: 1 – участок проволоки с микротрещиной на поверхности; 2 – направление скручивания проволоки; 3 – направление остаточных растягивающих макронапряжений на поверхности; 4 – концентратор растягивающих макронапряжений у вершины растущей трещины; 5 – продольные касательные напряжения; 6 – сжимающие остаточные макронапряжения; 7 – вершина микротрещины

напряжений  $\sigma_z$ , нормально ориентированных к направлению текстуры проволоки. Сжимающие напряжения  $\sigma_z$  в направлении вдоль границ зерен начинают преобладать над растягивающими  $\sigma_r$ , подавляя тем самым рост микротрещины.

По этим причинам продольная магистральная трещина образуется только при незначительных углах поворота проволоки, при которых на вероятность появления расслоения решающее значение оказывают остаточные макронапряжения на ее поверхности (рис. 2).

Растягивающие напряжения, нормально ориентированные по отношению к микротрещине (окружные напряжения), способствуют концентрации напряжений у вершины, раскрытию и росту микротрещины, образованию магистральных макроскопических трещин по длине образца (рис. 2). Сжимающие напряжения подавляют развитие микротрещины, предотвращая тем самым расслоение проволоки при скручивании. Чем ниже доля растягивающих остаточных макронапряжений в проволоке, тем меньше вероятность ее расслоения при скручивании.

#### Причины возникновения растягивающих макронапряжений на поверхности проволоки после волочения

Упругие деформации незначительно влияют на величину остаточных напряжений в проволоке. Деформация с остаточной величиной 0,2% снимает остаточные напряжения приблизительно на 60%.

Пластическая деформация проволоки с остаточной величиной 0,7–1,0% полностью снимает макронапряжения и после снятия нагрузки формирует новые остаточные макронапряжения, обусловленные этой деформацией [2].

Следовательно, факторы, влияющие на величину остаточных макронапряжений, ограничены деформациями проволоки на последней протяжке и дополнительными упругопластическими деформациями, которые претерпевает проволока после волочения.

Остаточные растягивающие макронапряжения в проволоке при волочении формируются из-за влияния двух основных факторов.

1. Наличие изгиба (сжатием поверхностного слоя) в области перехода от рабочего конуса к калибрующей части. После упругого восстановления на поверхности проволоки формируются остаточные растягивающие макронапряжения, величина которых зависит от геометрии переходной области из рабочего конуса волокна к цилиндрической части (угол рабочего конуса, радиус перехода). Чем больше деформация изгиба в этой области, тем выше остаточные растягивающие макронапряжения на поверхности проволоки.

2. Сдвиговые напряжения в цилиндрической части волокна из-за трения. Периферийные слои при волочении подвергаются большим деформациям сдвига в продольном направлении, чем центральные [3]. После окончания процесса волочения периферийные слои укорачиваются больше,

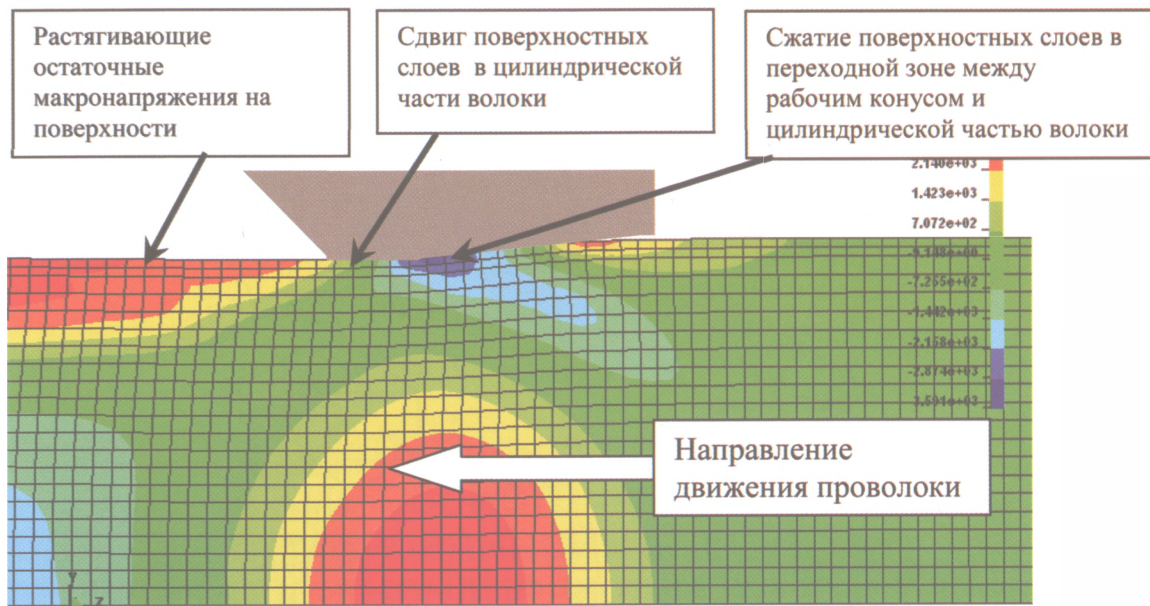


Рис 3. Поле напряжений при волочении проволоки

чем центральные, поэтому неизбежно появление растягивающих остаточных напряжений на поверхности и сжимающих в центральных слоях. Определяющей является сила трения в цилиндрической части, чем больше сила трения, тем выше величина остаточных растягивающих макронапряжений на поверхности (рис. 3).

Для снижения уровня остаточных напряжений в проволоке после волочения используют чистовые волокна с малыми углами рабочего конуса и сплаженным переходом к цилиндрической части. Применяют высокоэффективные смазки, напорные волокна, устройства для гидродинамического волочения. Это известные (традиционные) пути уменьшения уровня растягивающих макронапряжений.

Наиболее эффективно снижают склонность проволоки к расслоению дополнительные деформации с малыми остаточными величинами (порядка 0,2–1,0%). При оптимальном подборе напряженного состояния малые деформации способны не только уменьшить уровень растягивающих напряжений, но и изменить их знак на поверхности проволоки после волочения. В этих случаях эффективность дополнительной обработки может достигать 100%, а именно 100% расслоений образцов проволоки до обработки и 0% после нее.

Для перераспределения остаточных напряжений в проволоке используют простые деформации – растяжение и сжатие; сложные – изгиб (сжатие – растяжение), кручение; поверхностные деформации (обкатка, дробеструйная обработка, протяжка с обжатыми порядками 0,01–1,00%).

### Упругопластическое растяжение как способ уменьшения остаточных напряжений

Пластическая деформация проволоки под действием чистого растяжения или сжатия способствует уменьшению остаточных напряжений [2]. Упругопластическое растяжение требует приложения к проволоке внешнего усилия порядка величины ее  $\sigma_{0,2}$ , поэтому на практике метизного производства встречается только совместно с термической обработкой.

Так, при кратковременном отжиге холоднотянутой проволоки в свинцовой ванне на агрегате бронзирования ( $t \approx 430^\circ\text{C}$ ) на РУП «БМЗ» происходит пластическая вытяжка величиной в пределах 0,1–1,0%, причем тем больше, чем выше внешнее растягивающее усилие, действующее на проволоку. На агрегате № 1 из-за его конструктивных особенностей натяжение на проволоку при переработке в несколько раз выше, чем на агрегате

#### Вытяжка заготовки бортовой проволоки при отжиге в свинцовой ванне

Позиция	Средний диаметр проволоки на размотке, мм	Средний диаметр проволоки на намотке, мм	Вытяжка на агрегате, %
Агрегат № 1			
1.2.04	1,607	1,603	0,497
1.2.03	1,306	1,300	0,917
1.2.02	1,606	1,602	0,498
Агрегат № 2			
2.2.20	1,599	1,597	0,250
2.2.14	1,608	1,605	0,373

№ 2. Уменьшение диаметра проволоки после термообработки составляет приблизительно от 2–3 до 6–7 мкм, причем меньшие значения вытяжки характерны для проволоки на агрегате № 2, а большие – на агрегате № 1. Результаты измерений приведены в таблице.

Доля расслоений высокопрочной проволоки диаметром 1,30–1,60 мм после переработки на агрегате № 2 в 2–3 раза больше, чем такой же проволоки на агрегате № 1. Для установления влияния малой пластической деформации растяжения на склонность проволоки к расслоению был проведен лабораторный эксперимент.

Образцы бортовой проволоки диаметром 1,60 мм с помощью машины для испытаний на разрыв растягивали до нагрузки в диапазоне от  $\sigma_{0,2}$  до  $\sigma_B$ . Уменьшение диаметра проволоки после снятия нагрузки составляло 5–7 мкм (сопоставимо вытяжке проволоки на агрегате № 1). Полученные образцы испытывали на скручивание и сравнивали с исходными. Как показали результаты испытаний, количество отклонений по числу скручиваний у проволоки после упругопластического растяжения снизилось приблизительно на 50–70% в сравнении с исходной проволокой.

Промышленное применение подобного способа затруднено, так как избыточное натяжение проволоки в свинцовой ванне отрицательно влияет на ее прямолинейность из-за изгиба в свинцовой ванне. Кроме того, сильнодеформированная проволо-

ка имеет незначительный запас пластичности при разрыве, что увеличивает возможность обрывов при ее переработке, особенно по сварным швам.

Эффективность упругопластического растяжения относительно невелика, так как при этом снижается только уровень растягивающих макронапряжений без изменения их знака.

#### Изгиб и изгиб с растяжением

Чистый упругопластический изгиб холоднотянутой проволоки изменяет характер остаточных напряжений после волочения. После снятия изгибающей нагрузки на поверхности проволоки остаются неоднородные остаточные напряжения – сжимающие  $\sigma_{ост\ сж}$  с одной и растягивающие  $\sigma_{ост\ раст}$  с обратной стороны (рис. 4).

Близкие к чистому изгибу напряжения испытывает проволока при обработке в рихтовальном устройстве с большим соотношением шага роликов к диаметру проволоки (приблизительно >25). Этот способ в принципе не позволяет получить сжимающие напряжения по всему периметру образца. Для получения лучших результатов необходимо одновременно с упругопластическим изгибом прикладывать к проволоке внешнее растягивающее усилие  $F_{раст}$  (рис. 5).

Подобный способ улучшения характеристик кручения проволоки, основанный на дополнительной деформации изгиба с растяжением, предложен фирмой «Беккерт» [4]. Однако у него есть ряд принципиальных недостатков:

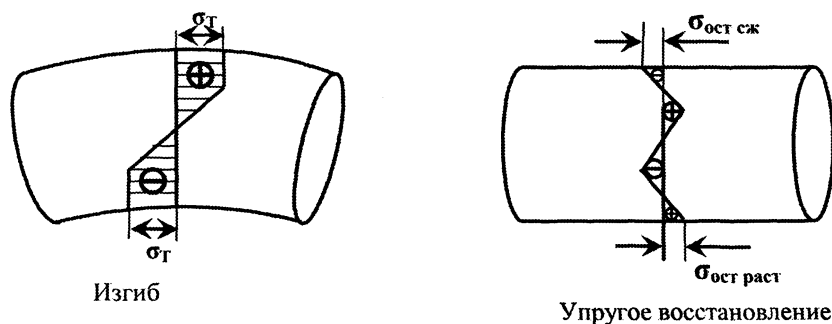


Рис. 4. Эпюра продольных напряжений при изгибе

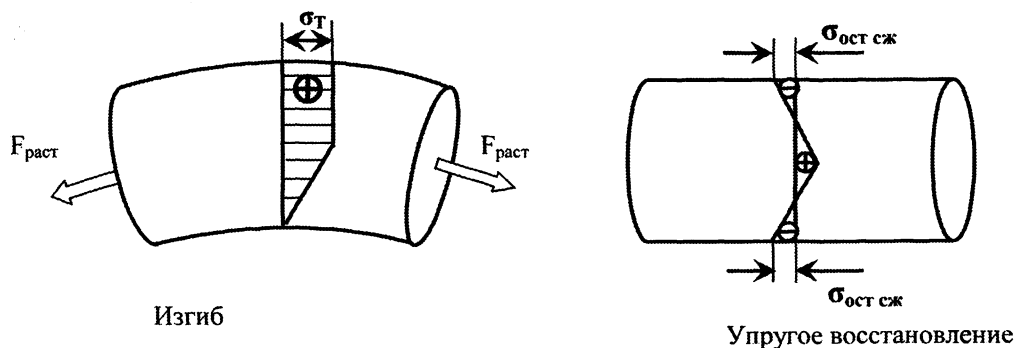


Рис. 5. Эпюра продольных напряжений при изгибе с растяжением проволоки

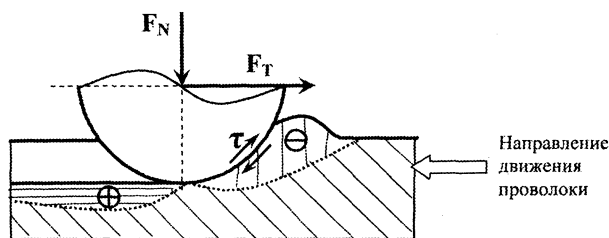


Рис. 6. Область контакта поверхности движущейся проволоки с неподвижной полусферой: ⊕ – зона растягивающих напряжений; ⊖ – зона сжимающих напряжений

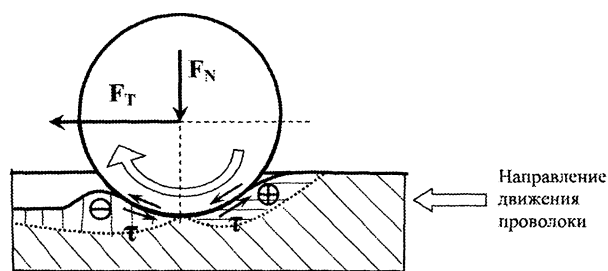


Рис. 7. Область контакта поверхности движущейся проволоки со сферой, вращающейся по направлению ее движения

1) большие растягивающие усилия на поверхности проволоки ( $\sigma_T$ ) при малом запасе пластичности на разрыв – риск обрывов особенно по сварным швам;

2) неизбежное искривление проволоки из-за наличия упругопластического изгиба.

Пластический изгиб с растяжением является эффективным способом создания сжимающих напряжений. Однако, несмотря на эффективность, в серийном производстве используется ограниченно, в частности, при обработке в рихтовальном устройстве проволоки относительно больших диаметров.

#### Поверхностные пластические деформации холоднотянутой проволоки

К этому виду относятся пластические деформации тонкого поверхностного слоя проволоки под воздействием внешнего твердого тела. При этом основное сечение проволоки практически не изменяет первоначальную форму.

К поверхностным пластическим деформациям относятся обкатка роликами, шариками, дробеструйная и пескоструйная обработка, протяжка через волоку с обжатиями порядка 0,01–1,00% и др. Напряжения на поверхности проволоки пере-

распределяются за счет контакта с твердым телом с усилием в области контакта, превышающим ее предел текучести. Знак остаточных напряжений на поверхности проволоки после обработки определяется формой деформирующего тела, направлением сил трения и давлением в области контакта.

Так, если к жесткой полусферической поверхности, прижатой к поверхности проволоки с нормальным усилием  $F_N$ , будет приложено тяговое усилие  $F_T$ , то из-за трения появятся сдвиговые напряжения  $\tau$ , препятствующие поступательному движению полусферы. После обработки на поверхности проволоки останутся растягивающие остаточные напряжения (рис. 6). Это неблагоприятный вариант поверхностной пластической деформации.

При контакте поверхности проволоки с вращающейся в направлении ее движения сферой знак остаточных напряжений будет зависеть от направления сдвиговых напряжений  $\tau$  на поверхности проволоки. Как показано на рис. 7, в случае превышения скорости вращения сферы над скоростью поступательного движения проволоки возможно образование сжимающих остаточных напряжений на ее поверхности после обработки.

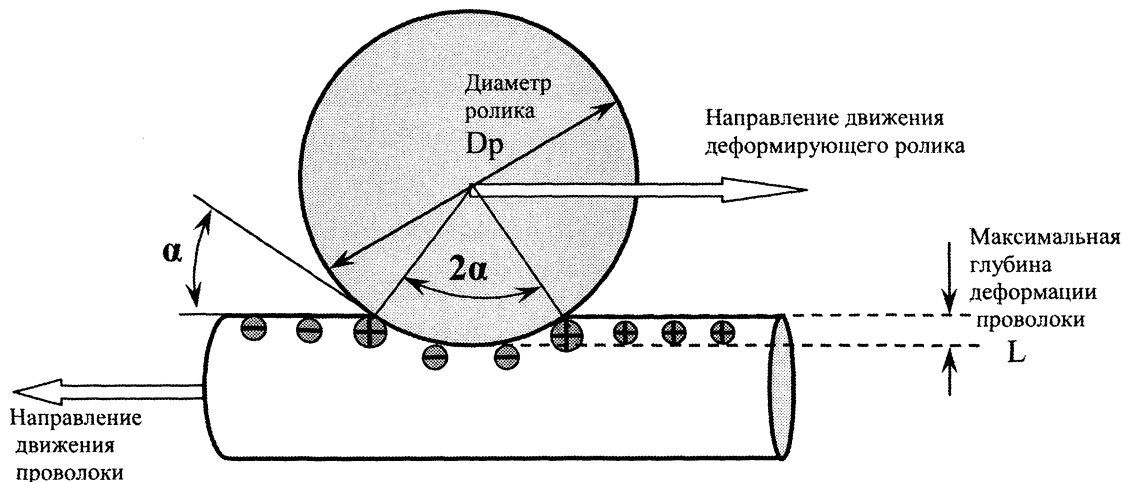


Рис. 8. Перераспределение остаточных продольных макронапряжений на поверхности ролика при обкатке: ⊕ – растягивающие остаточные макронапряжения на поверхности исходной проволоки; ⊕ – растягивающие макронапряжения при изгибе поверхностного слоя; ⊖ – сжимающие остаточные макронапряжения на поверхности проволоки после обкатки

В отсутствии сил трения (например, при контакте с неприводным вращающимся роликом) знак остаточных напряжений на поверхности проволоки определяется изгибом в области контакта с роликом. Так, если тонкий поверхностный слой проволоки при изгибе испытывает пластическую деформацию сжатия (вогнутый изгиб), то после снятия внешней нагрузки после упругого восстановления на поверхности проволоки остаются растягивающие напряжения (+). Такую деформацию испытывает поверхность проволоки, например, в переходной части волокна от рабочего конуса к цилиндрической части. Если поверхность проволоки подвергнуть деформации растяжения (выпуклый изгиб), знак остаточных напряжений на поверхности будет минус (сжимающие).

Принципиальная схема изменения знака продольных макронапряжений поверхности проволоки при обкатке цилиндрическим роликом с малым радиусом показана на рис. 8.

В [5] отмечено, что при дополнительной упругой деформации, осуществляемой путем вдавливания в поверхность протягиваемой проволоки твердых тел, сферической или цилиндрической формы, радиус поверхности тела должен составлять  $R_{пов} \leq 6,5r_{пр}$ , где  $r_{пр}$  – радиус проволоки. Очевидно, от радиуса твердого тела зависит изгибающее усилие поверхностных слоев проволоки: чем меньше радиус поверхности ролика, тем больше угол  $\alpha$  между ней и поверхностью проволоки в зоне контакта. На практике выполнения условия  $R_{пов} \leq 6,5r_{пр}$  при обкатке роликом трудно достичь, так как для тонкой проволоки (например, диаметром 0,185 мм) необходим ролик диаметром порядка миллиметра.

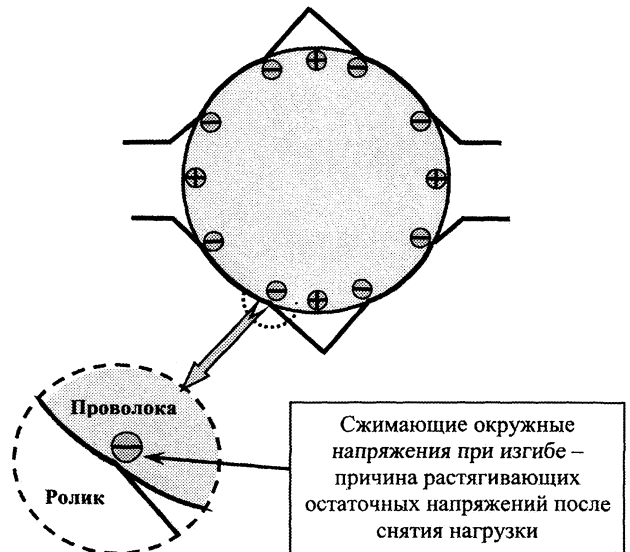


Рис. 9. Перераспределение остаточных окружных макронапряжений на поверхности проволоки при обкатке роликом с радиусной формой канавки

Геометрия канавки деформирующего ролика определяет знак остаточных напряжений. Так, после обкатки поверхности проволоки роликом, имеющим на поверхности канавку радиусной формы, на поверхности проволоки могут остаться растягивающие напряжения (рис. 9).

Форма деформирующего проволоку твердого тела при поверхностной пластической деформации очень важна, так как она определяет не только величину, но и знак остаточных макронапряжений на поверхности проволоки. Сжимающие остаточные макронапряжения можно получить при обработке поверхности твердым телом со сферической (выпуклой) или плоской формой, соответственно растягивающие остаточные напряжения – при обработке роликом с радиусной формой канавки

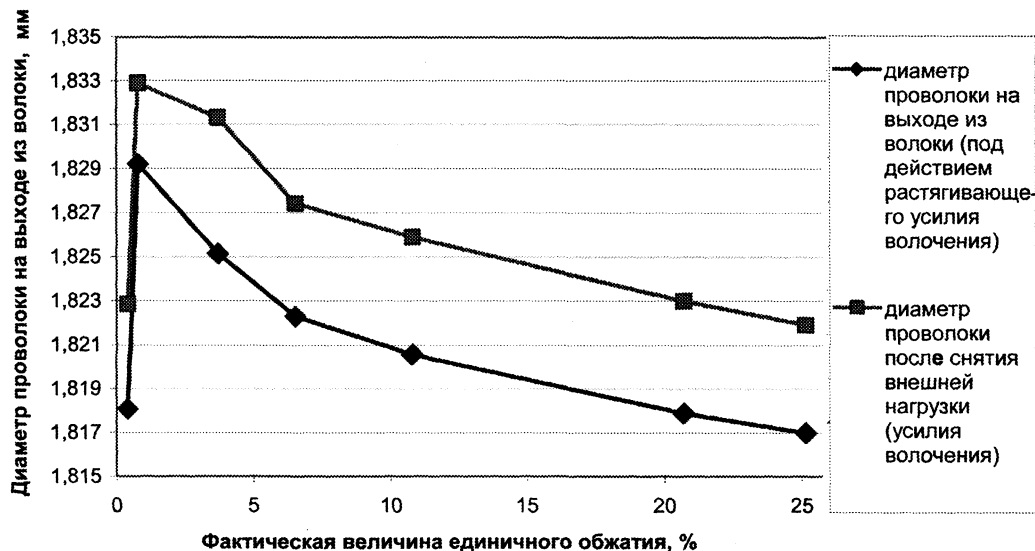


Рис. 10. Зависимость диаметра проволоки после протяжки через волоку от величины обжатия

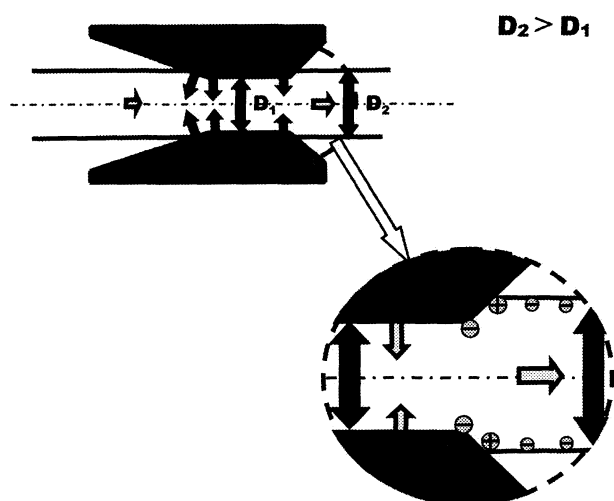


Рис. 11. Перераспределение остаточных напряжений на поверхности проволоки при протяжке с малыми обжатиями

с размерами, близкими к размерам проволоки. Такое же значение имеет направление силы трения в области контакта проволоки с деформирующим телом.

К поверхностной обработке можно отнести также калибрующую протяжку проволоки через волоку с преимущественно упругой деформацией [6].

На выходе проволоки из рабочего канала волоки происходит упругое восстановление в радиальном направлении, причем величина его зависит от доли сжимающих напряжений в напряженном состоянии проволоки, т. е. от величины обжатия. За-

висимость диаметра проволоки на выходе от величины обжатия приведена на рис. 10.

Упругое восстановление способствует перераспределению остаточных напряжений в поверхностном слое проволоки из-за наличия двойного изгиба на выходе из волоки (рис. 11).

В результате эксперимента установлено, что максимальный диаметр проволоки при протяжке через одну и ту же волоку соответствует величине единичного обжатия 0,5–1,0%. Это наиболее оптимальная величина обжатия для получения сжимающих напряжений в поверхностном слое и улучшения пластичности проволоки. Основным препятствием для внедрения данного способа является быстрый износ волоки из-за высоких радиальных напряжений.

### Вывод

Склонность холоднодеформированной проволоки к расслоению во многом обусловлена наличием на ее поверхности растягивающих остаточных макронапряжений. Снизить уровень напряжений можно за счет применения дополнительной деформации проволоки после волочения. Максимальный эффект достигается при изменении знака напряжений путем пластических деформаций поверхности проволоки твердыми телами. Поверхностные деформации в отличие от упругопластического изгиба / растяжения не ухудшают прямолинейности проволоки и исключают обрывы проволоки при переработке.

### Литература

1. Годецки Л. // Wire Industry, Октябрь 1971.
2. Мрочек Ж. А., Макаревич С. С., Кожуро Л. М. и др. Остаточные напряжения: Учеб. пособ. Мн.: УП «Технопринт», 2003.
3. Перлин И. Л. Теория волочения. М.: Металлургия, 1956.
4. Пат. ЕР0611669.
5. Пат. ВУ 19980828.
6. Мешков Ю. Я., Меттус Г. С. // Сталь. 1987. № 3. С. 72–73.