



It is shown that reduction of twisting numbers up to destruction of cold drawn wire for bead rings is stipulated by junction of microcracks formed in longitudinally- and transverse-oriented planes of deformation shift with creation of main crack.

А.Н. САВЕНОК, А.В. ДЕМИДОВ, Ю.Д.ГУБАНОВ, Е.С. СЕРЕГИНА, РУП «БМЗ»

УДК 669.

РАССЛОЕНИЕ ПРИ СКРУЧИВАНИИ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ ШИН

Эксплуатационные характеристики автомобильных шин зависят от механических характеристик всех конструктивных элементов, в том числе проволоки для армирования бортов. Основную нагрузку при эксплуатации бортовое кольцо воспринимает от внутреннего давления в шине в виде растягивающего усилия по всей длине бортового кольца. Поэтому основными требованиями к проволоке для армирования бортов шин являются характеристики сопротивления деформации растяжения – временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и др.

Высокая прочность при разрыве бортовой проволоки достигается за счет холодной пластической деформации волочением, максимально допустимый предел которой ограничен порогом расслоения – резким снижением сопротивления сложным видам деформации (изгибу, кручению). Проволока для бортовых колец шин испытывает сложные деформации, в частности при переработке, монтаже шины, поэтому сохранение приемлемого уровня пластичности в условиях сложного напряженного состояния является ее важнейшей характеристикой качества. Практически все типоразмеры проволоки для бортовых колец шин испытываются на показатели количества скручиваний до разрушения и наличия расслоения.

Явление расслоения связано с образованием магистральной трещины в продольном направлении – направлении минимального сопротивления деформации сдвига холоднотянутой проволоки. После достижения порога расслоения проволока проявляет склонность к преждевременному разрушению при сложных видах деформации – изгибе, кручении, т. е. при наличии продольно-ориентированных касательных напряжений.

Деформация сдвига при скручивании распределяется в объеме проволоки крайне неравномерно,

преимущественно по локализованным плоскостям (линиям сдвига). На начальном этапе кручения линии максимальной деформации сдвига ориентированы преимущественно вдоль ее оси [1] – в направлении минимального сопротивления деформации холоднотемпературной проволоки. С увеличением угла поворота уменьшается величина действующих в этом направлении касательных напряжений и пластическая деформация в первоначально продольных плоскостях сдвига затухает. Одновременно с этим непрерывно образуются новые плоскости локализованного сдвига, ориентированные параллельно оси проволоки (рис. 1).

На рисунке показаны пересекающиеся под разными углами линии локализованной деформации сдвига (полосы скольжения), имеющие различный угол наклона к направлению оси проволоки. Особенно благоприятные условия для зарождения трещин создаются при встрече растущего двойника в новых плоскостях скольжения с ранее образовавшимися, для которого было характерно другое направление двойникования [2]. В этом случае концентрация напряжений в месте встречи особенно велика (рис. 2).

Отрыв от плоскости скольжения и собственно образование микротрещины происходит под действием нормальных напряжений, перпендикулярных ее направлению. Они возникают в результате искривления плоскостей скольжения дислокациями, располагающимися в других плоскостях (рис. 3).

Очаги образования микротрещин могут также появляться в местах скопления дислокаций вблизи каких-либо барьеров: включений, избыточных фаз, закрепленных атомами внедрения дислокаций, границ зерен и др. [3].

Растягивающие напряжения, вызванные скоплением дислокаций, суммируются с нормально

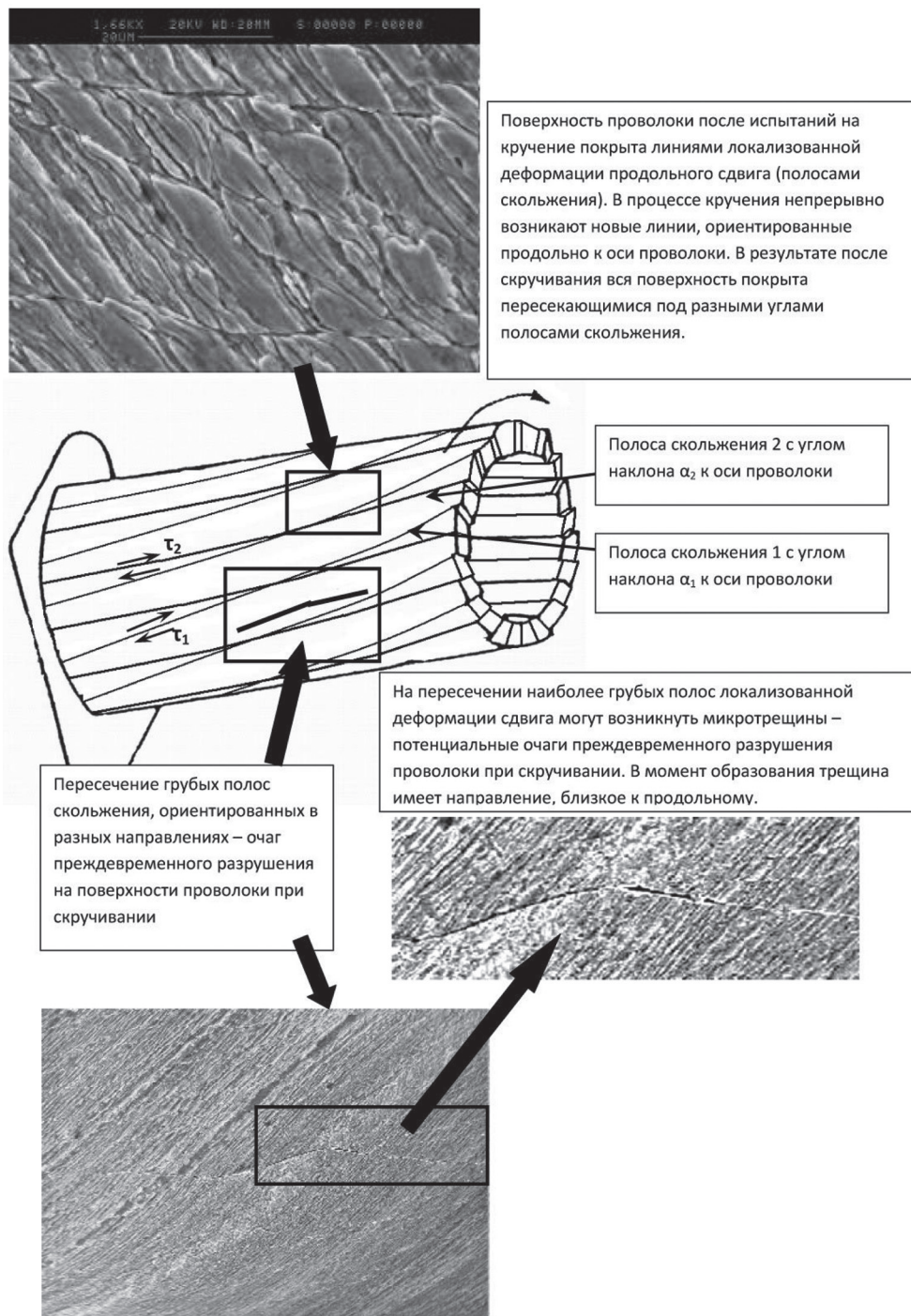


Рис. 1. Полосы скольжения и микротрещины на поверхности проволоки, образовавшиеся при кручении

ориентированными к микротрещине внутренними напряжениями в проволоке. Следовательно, развитие магистральной трещины определяется двумя основными факторами: неоднородностью пластической деформации сдвига при кручении и знаком (величиной) нормально-ориентированных к микротрещине напряжений. Чем грубее полосы локализованной деформации продольного сдвига в проволоке при кручении, тем выше вероятность образования трещин. Растягивающие внутренние напряжения способствуют росту зародившейся микротрещины до магистральной макротрещины.

Окончательное разрушение проволоки при скручивании связано с массовым образованием поперечно-ориентированных плоскостей скольжения при достижении определенного угла поворота поверхностных слоев проволоки (более 45° к оси). Проволока, не склонная к расслоению, разрушается поперечным сдвигом с образованием ровного излома. При наличии на поверхности проволоки магистральной трещины, образовавшейся на ранних этапах кручения, механизм разрушения может измениться: образующаяся в поперечных плоскостях сдвига магистральная трещина принимает

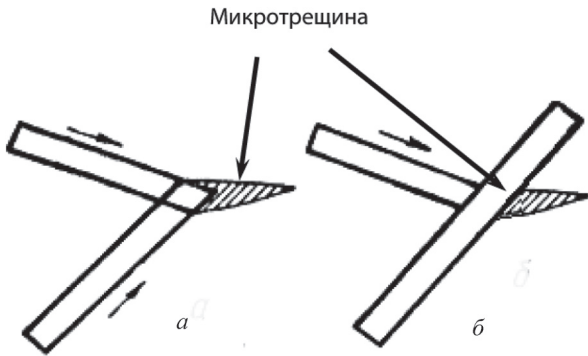


Рис. 2. Схема возникновения трещины при встрече развивающихся двойников (а) и торможения одного двойника другим (б)

форму спирали, концы которой замыкаются по краям продольной микротрещины (рис. 4).

Разрушение проволоки с образованием ступенчатого излома при меньших угловых деформациях слоев проволоки становится более вероятным, чем



Рис. 3. Схема зарождения трещины у вершины дислокационного скопления

при разрушении путем ровного среза (рис. 4) при углах поворота текстуры поверхностных слоев проволоки менее 45° по отношению к оси проволоки. Как следствие, образцы бортовой проволоки с пониженным числом скручиваний до разрушения практически всегда имеют неровный (ступенчатый) основной излом (рис. 5).

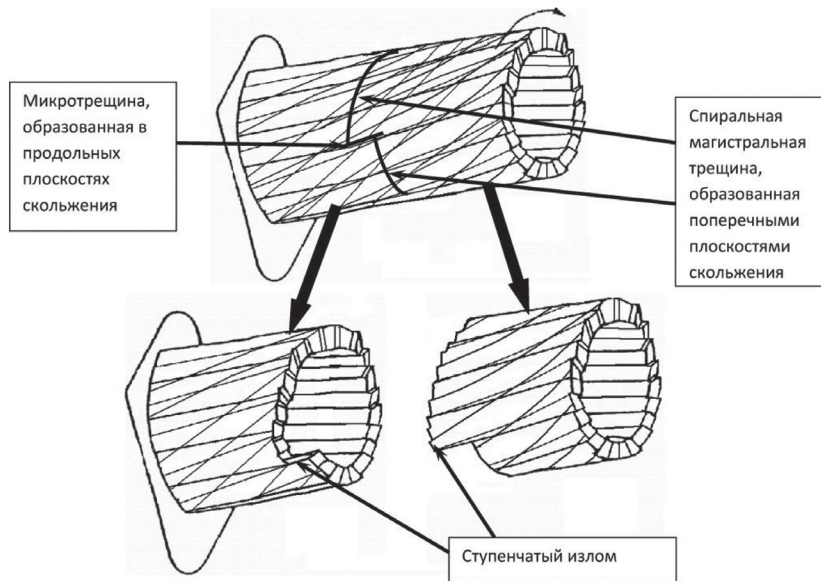


Рис. 4. Образование ступенчатого излома при слиянии продольно-ориентированной микротрещины с поперечными плоскостями скольжения

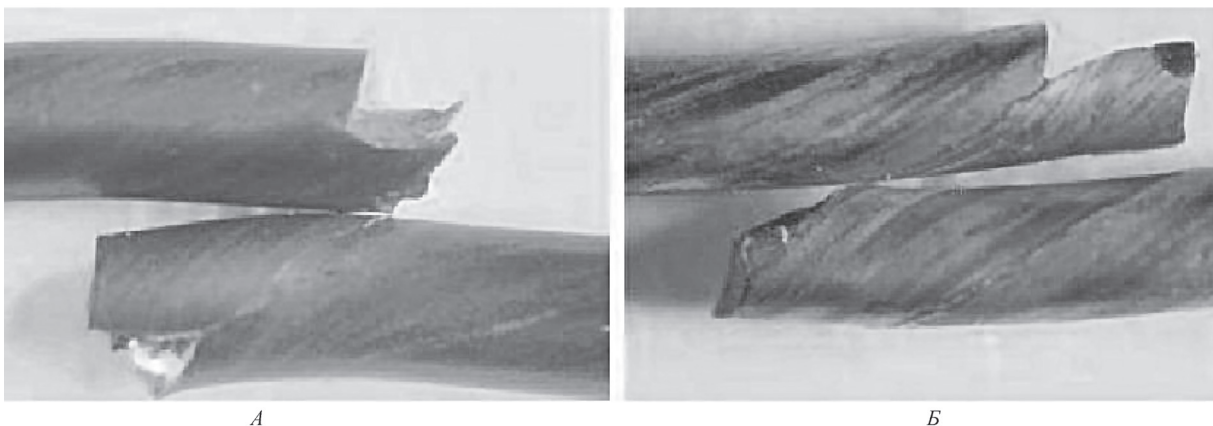


Рис. 5. Образцы проволоки с пониженными значениями числа скручиваний до разрушения и со ступенчатым изломом



Рис. 6. Образцы проволоки с продольно-ориентированной трещиной и ровным основным изломом после разрушения (образцы с нестабильными характеристиками числа скручиваний до разрушения)

На рисунке приведены два основных типа образцов с низкими показателями числа скручиваний и со ступенчатым изломом:

- образец *A* – с локальной (короткой) трещиной по линиям продольного скольжения слоев металла;
- образец *B* – с магистральной трещиной, образовавшейся в продольном направлении, на значительном участке проволоки и закрученной в виде спирали.

Наличие трещины в направлении продольного сдвига свидетельствует о снижении пластичности проволоки при кручении (рис. 6).

Вероятность образования и раскрытия микротрещины на поверхности проволоки при кручении

во многом определяется знаком и величиной остаточных напряжений, накопленных в проволоке предшествующей пластической деформацией. Так, наличие растягивающих остаточных напряжений, ориентированных вдоль периметра проволоки, способствует раскрытию микротрещины и появлению расслоения [4] (рис. 7).

Сжимающие напряжения подавляют развитие микротрещины, предотвращая, тем самым, расслоение проволоки при скручивании.

Наиболее эффективным способом релаксации внутренних напряжений, накопленных в структуре заготовки при волочении, является кратковременная термическая обработка заготовки (отжиг для

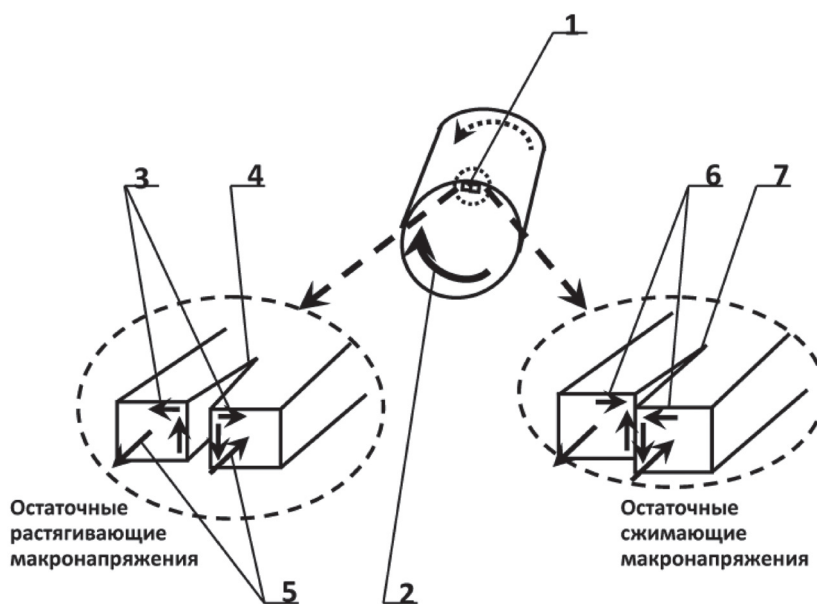


Рис. 7. Образование расслоения под действием растягивающих напряжений на поверхности проволоки при кручении: 1 – участок проволоки с микротрещиной на поверхности; 2 – направление скручивания проволоки; 3 – направление остаточных растягивающих макронапряжений на поверхности; 4 – концентратор растягивающих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

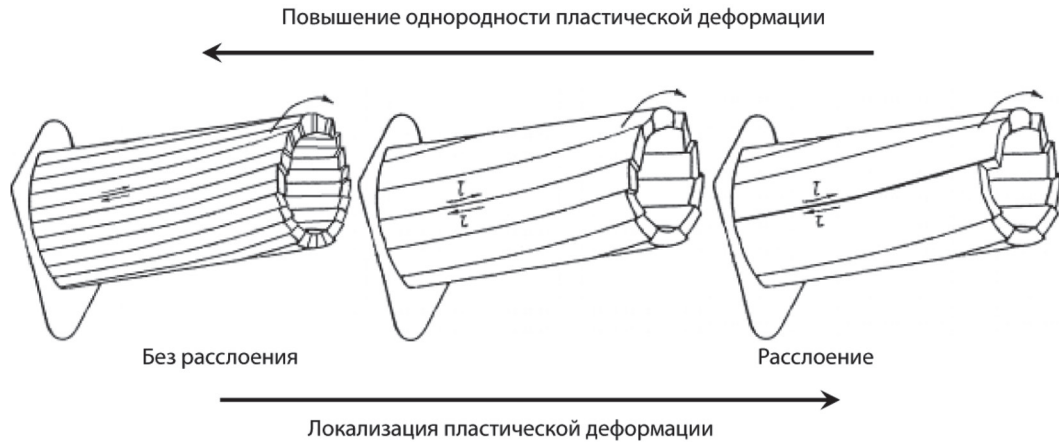
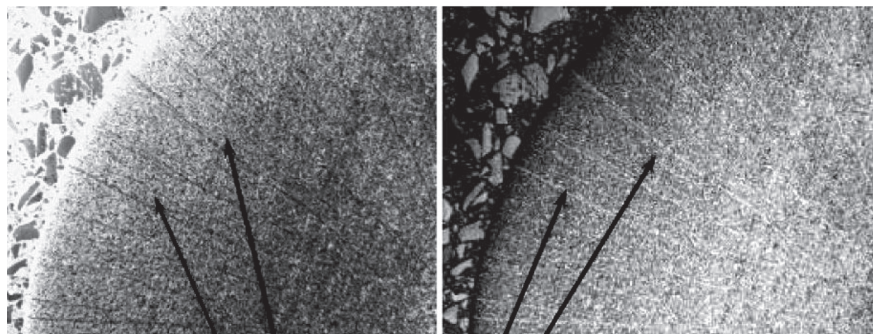


Рис 8. Влияние неоднородности деформации продольного сдвига при скручивании бортовой проволоки на вероятность появления магистральной трещины

снятия напряжений) при температуре 400–450 °С в течение около 2 с. Требуемые характеристики относительного удлинения достигаются за счет аннигиляции дислокаций – резкого снижения плотности дефектов кристаллической решетки. В то же время аннигиляция дислокаций при кратковременной термообработке бортовой проволоки сопрово-

ждается нежелательными структурными изменениями: выделениями структурно-свободного цементита. Как следствие, бортовая проволока имеет более неоднородную микроструктуру в сравнении с холоднодеформированной заготовкой. Суммарное действие двух основных факторов кратковременной термической обработки (релаксации оста-



Равномерное распределение линий сдвига (полос локализованной деформации) при отсутствии грубых концентраторов напряжений (поверхностных дефектов).

Грубая полоса локализованной деформации сдвига у основания поверхностного дефекта (трещина) – потенциальный очаг расслоения проволоки при скручивании

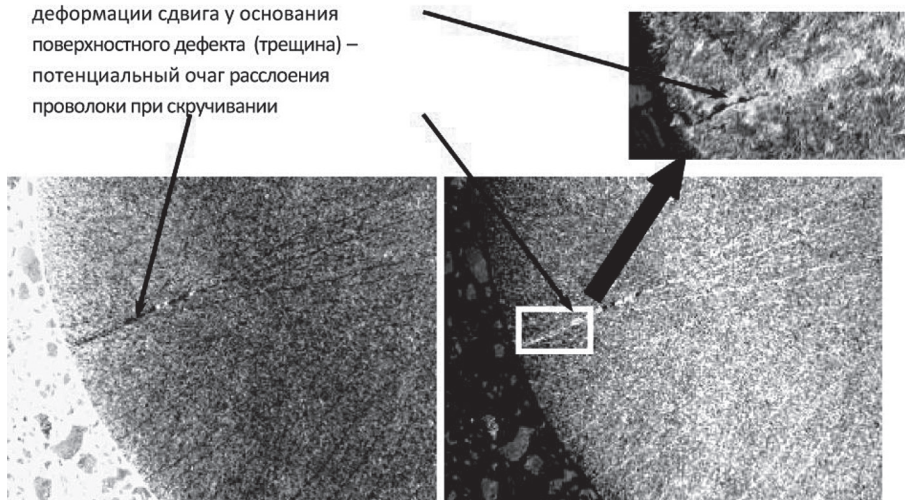


Рис. 9. Поперечные шлифы образцов проволоки после скручивания

точных напряжений, с одной стороны, и нежелательные структурные изменения с другой) неоднозначно изменяют характеристики проволоки для бортовых колец шин при скручивании. На практике во избежание избыточных структурных изменений тщательно подбирают химический состав и температурно-временные режимы термической обработки холоднотянутой заготовки.

Структура холоднотемпературнодеформированной проволоки в большей степени определяется исходной заготовкой. Так, наличие структурно-свободного феррита (по границам зерен) облегчает локализацию на этих участках пластической деформации при волочении. Грубые поверхностные дефекты (раскатанные пузыри, вкатанная окалина) способствуют локализации на этих участках пластической деформации продольного сдвига при скручивании (рис. 8), что подтверждается при последующем анализе микроструктуры образцов после скручивания (рис. 9).

Из рисунка видно, что полосы локализованной деформации при кручении концентрируются у основания дефектов структуры проволоки – раскатанных пузырей, поверхностных дефектов волочения и др. Но основное влияние на склонность проволоки к расслоению оказывают микродефекты, не определяемые металлографическими методами, к которым относятся микротрещины, накопленные в процессе холодной пластической деформации. Подбор исходной заготовки (катанки) с максимально равномерной структурой мелкодисперсного сорбита имеет большое значение для предотвращения расслаивания проволоки для бортовых колец шин при скручивании.

В то же время повышенные требования к исходной заготовке способствуют неизбежному удорожанию ее производства на металлургическом переделе, что экономически далеко не всегда целесообразно. Поэтому на практике применяют комплекс мер, способствующих снижению уровня остаточных напряжений в бортовой проволоке на всех этапах ее производства. В частности, используют чистовые волокна с малыми углами рабочего конуса и сглаженным переходом к цилиндрической части, применяют высокоэффективные волочильные смазки, напорные волокна и др. Высокую эффективность в ряде случаев имеют дополнительные упругопластические деформации проволоки с малыми величинами остаточных деформаций (порядка 0,2-1,0%) в процессе и после волочения [5]. За счет использования дополнительных деформаций волоченой проволоки можно не только уменьшить уровень растягивающих напряжений на поверхности, но и изменить их знак [4].

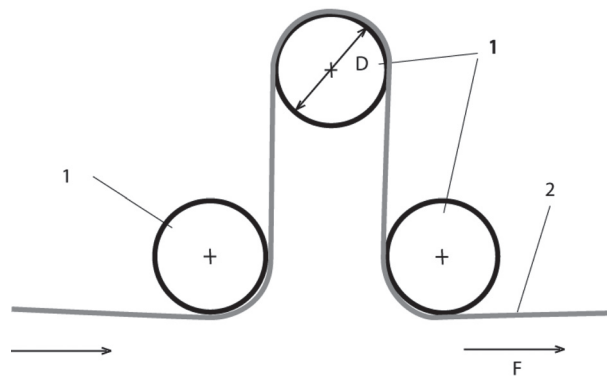


Рис. 10. Устройство для снятия остаточных напряжений бронзированной проволоки, предложенное фирмой «Bekaert»: 1 – изгибающие ролики; 2 – проволока

Один из способов перераспределения остаточных напряжений в проволоке после волочения включает в себя знакопеременный изгиб на проволоке с одновременным приложением внешнего растягивающего усилия $F_{\text{раст}}$. Подобный способ дополнительной обработки проволоки предложен фирмой «Bekaert» [6] (рис. 10).

Как видно из рисунка, стальная проволока 2 изгибается под воздействием растягивающей силы F с использованием нескольких последовательно установленных роликов диаметром D . Чем выше сила растяжения F , тем меньше шансов остается для остаточных макрорастягивающих напряжений и если растягивающие напряжения исчезли, степень остаточных макросжимающих напряжений увеличивается. Чем больше количество разных плоскостей, в которых расположены изгибающие ролики 1, тем выше эффект повышения пластических свойств проволоки.

Однако этот способ улучшения характеристик кручения проволоки имеет ряд принципиальных недостатков:

- большие растягивающие усилия на поверхности проволоки (σ_T) при малом запасе пластичности на разрыв: риск обрывов при производстве особенно по сварным швам;
- искривление проволоки из-за упругопластического изгиба.

Изменение знака остаточных макронапряжений поверхностного слоя волоченой проволоки возможно путем воздействия на них внешнего твердого тела. При этом основное сечение проволоки практически не изменяет форму, что является преимуществом в сравнении, например, с изгибом или изгибом с растяжением – не ухудшается исходная прямолинейность бортовой проволоки.

К поверхностным пластическим деформациям можно отнести обкатку проволоки роликами, шариками, дробеструйную и пескоструйную обработку, протяжку через волоку с обжатиями порядка 0,01–1,00% и др.

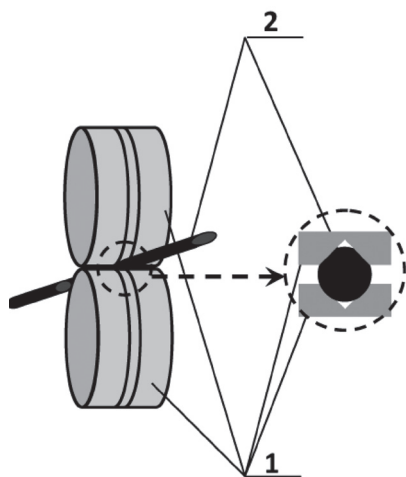


Рис. 11. Обкаточное устройство для перераспределения остаточных напряжений проволоки

На рис. 11 показан пример обкаточного устройства, которое может быть использовано для создания сжимающих окружных остаточных напряжений на поверхности холоднотянутой проволоки 1.

Устройство представляет собой два ролика 1 из твердого сплава с угловыми канавками, которые воздействуют на проволоку круглого сечения 2 радиальными сжимающими напряжениями. Степень остаточной деформации проволоки находится в диа-

пазоне приблизительно 0,2–1,0% от исходного диаметра проволоки до обработки.

Выводы

1. Снижение числа скручиваний до разрушения холоднотянутой проволоки для бортовых колец шин обусловлено слиянием микротрещин, образовавшихся в продольно- и поперечно-ориентированных плоскостях деформации сдвига с образованием магистральной трещины (расслоение).

2. Для предотвращения расслаивания проволоки при скручивании целесообразно свести к минимуму факторы, способствующие локализации пластической деформации сдвига, образованию и раскрытию микротрещин, в частности, использовать исходную заготовку с максимально однородной структурой и пониженной плотностью барьеров для скольжения дислокаций; обеспечить минимальный уровень остаточных макро- и микронапряжений в проволоке путем подбора режимов волочения и использования устройств для снятия остаточных напряжений; подборки оптимальных режимов кратковременного отжига, обеспечивающих баланс между наиболее полной релаксацией остаточных напряжений в холоднотянутой заготовке при минимуме нежелательных структурных изменений.

Литература

1. Leszek Godecki. Явления, связанные с деформацией кручения стальной проволоки // WIRE INDUSTRY. Октябрь 1971 г.
2. Механические испытания и свойства металлов / В.С. Золотаревский. М.: Металлургия, 1974.
3. Kenichi Shimizu. Nozomu Kawabe. Аспекты механики разрушения при возникновении расслоения в высокоуглеродистой стальной проволоке // Wire Journal International. Март 2009 г.
4. Д е м и д о в А. В. Влияние дополнительных деформаций на механические свойства холоднодеформированной проволоки в условиях сложнапряженного состояния // Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 92–98.
5. М е ш к о в Ю. Я., М е т т у с Г. С. Повышение качества стальной холоднотянутой проволоки дополнительным упругим деформированием // Сталь. 1987. №3. С. 72–73.
6. Пат. EP0611669. 24.08.1994.