



*The classifier of breakings of drawn wire of the steel with pearlite structure, criteria and estimation of the wire layering degree are worked out.*

Е. С. СЕРЕГИНА, РУП «БМЗ»

УДК 669.

## СОЗДАНИЕ КЛАССИФИКАТОРА ИЗЛОМОВ ВОЛОЧЕНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ С ПЕРЛИТНОЙ СТРУКТУРОЙ ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ НА СКРУЧИВАНИЕ

На РУП «БМЗ» производят высокопрочную бортовую проволоку диаметром 1,5–1,83 мм из стали с содержанием углерода 0,8–0,9%. Трудность изготовления такой проволоки заключается в необходимости обеспечения пластических свойств – определенного числа скручиваний и отсутствии расслоения. Число скручиваний определяется при испытаниях на скручивание по ГОСТ 1545/80, при этом в зависимости от пластических свойств проволоки при ее разрушении от скручивания случаются различные виды изломов, иногда происходит расслоение – образование магистральной спиральной трещины, ступенчатый излом.

В технической литературе имеется недостаточно информации о видах изломов проволоки при скручивании, критериях оценки пластических свойств по видам изломов, причинах расслоения. Для определения данных характеристик волоченой бортовой проволоки, конкретных причин расслоения проволоки в металлографической лаборатории ЦЗЛ проводили исследования видов изломов проволоки после скручивания под стереоскопическим и электронным микроскопами, микроструктуры проволоки с расслоением и исходной катанки, анализ механических свойств и химического состава проволоки и катанки. Исследованы более 300 изломов бортовой бронзированной проволоки разных диаметров в основном из сталей 80–90, примерно 50 плавок катанки на дисперсность перлита, загрязненность неметаллическими включениями, наличие поверхностных дефектов, проведен анализ механических свойств химического состава около 150 плавок катанки.

В результате проведенной исследовательской работы установлены основные причины расслоения проволоки на РУП «БМЗ», разработаны классификатор изломов волоченой проволоки из ста-

ли с перлитной структурой, а также критерии и оценка степени расслоения проволоки (см. приложение).

В классификаторе частично использована характеристика видов изломов по британскому стандарту BSEN 10218-1: 1994 «Стальная проволока и проволочные изделия – общие положения». Данный документ содержит описание внешнего вида некоторых изломов, но не содержит конкретных критериев оценки пластических свойств и пригодности проволоки. Кроме того, проволока при разрушении от скручивания во многих случаях имеет не один излом, а несколько, что также нигде не рассматривалось. В настоящем классификаторе учтены все случаи изломов проволоки и разработаны критерии и оценка пластических свойств (степени расслоения) по видам изломов.

### Анализ напряженного состояния проволоки при испытаниях на скручивание

Для обоснования классификации изломов необходимо представить схему действия напряжений в проволоке при испытаниях на скручивание [1] (рис. 1):

- 1) поперечное сдвигающее напряжение  $\tau_n$  в плоскости, перпендикулярной оси проволоки;
- 2) продольное сдвигающее напряжение  $\tau_w$  в плоскости, параллельной оси проволоки;
- 3) основное сжимающее напряжение  $\sigma_3$  в наклонных сечениях под углом  $45^\circ$  к оси проволоки достигает максимального значения;
- 4) основное растягивающее напряжение  $\sigma_1$  в наклонных сечениях под углом  $45^\circ$  к оси проволоки достигает максимального значения.

Необходимо отметить, что на данной схеме обозначены напряжения при скручивании без учета остаточных напряжений исходной проволоки. Однако после волочения и бронзирования в проволоке имеются остаточные напряжения – сжимающие и растягивающие. Обычно это ради-

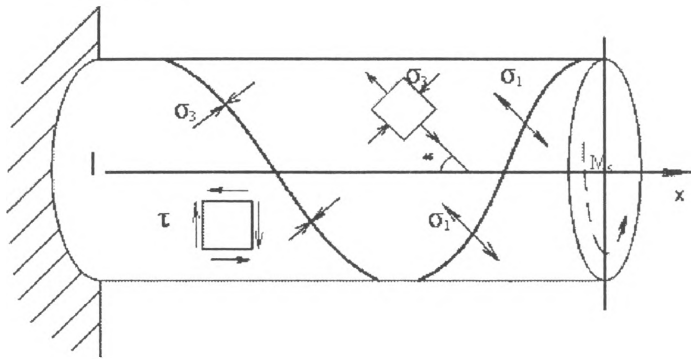


Рис. 1. Напряжения в проволоке при испытаниях на скручивание

альные сжимающие напряжения в центральной части проволоки и растягивающие осевые и окружные на поверхности проволоки. Если остаточные напряжения имеют высокий уровень и совпадают по направлению с напряжениями при скручивании, то они в совокупности с перечисленными выше напряжениями скручивания могут играть определяющую роль в образовании и росте трещины и излома. При совместном действии продольного сдвигающего напряжения и остаточных поверхностных растягивающих осевого и окружного образуются и быстро растут продольные трещины, происходит расслоение.

**Разработка классификатора изломов вольфрамовой проволоки со структурой пластинчатого перлита после испытания на скручивание**

Самый распространенный вид излома, который встречался в процессе исследования, — это нормальный излом, плоскость излома перпендикулярна оси проволоки (тип 1, приложение). Этот излом характерен для высокопластичной проволоки и является результатом действия поперечного сдвигающего напряжения  $\tau_n$  [1]. Оценка пластических свойств проволоки — хорошо.

Расслоение — образование спиральной трещины или ступенчатого излома при скручивании проволоки [2], оценка пластических свойств проволоки с таким видом излома — неудовлетворительно. Согласно [1], расслоение является результатом действия продольного сдвигающего напряжения  $\tau_w$ . По другим публикациям расслоения вызваны действием основного растягивающего напряжения  $\sigma_1$  и называются хрупкими изломами.

В результате исследования поверхности изломов проволоки на растровом электронном микроскопе Stereoscan 200 удалось получить визуальное подтверждение продольного характера деформации слоев металла при скручивании и образования локальных трещин продольного характера по линиям деформации в некоторых участках (рис. 2–4).

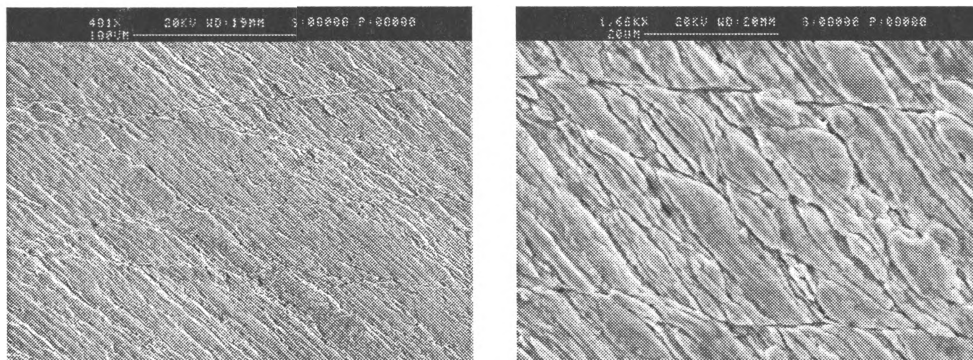


Рис. 2. Линии продольного скольжения слоев металла на поверхности проволоки после испытаний на скручивание

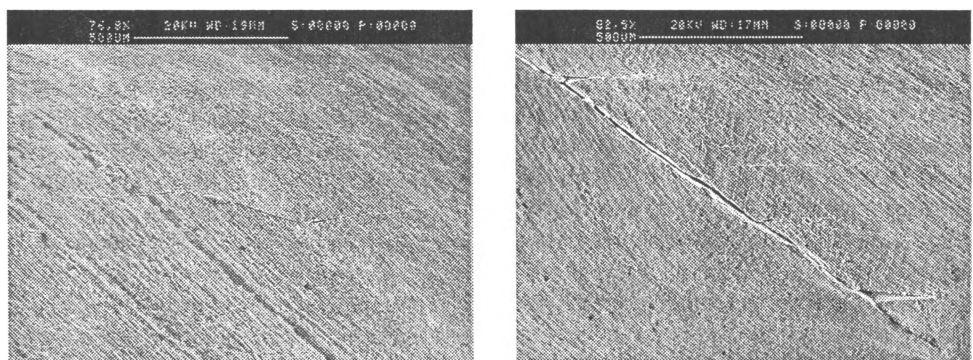


Рис. 3. Образование локальных продольных трещин по линиям продольного скольжения слоев металла на поверхности проволоки после испытаний на скручивание

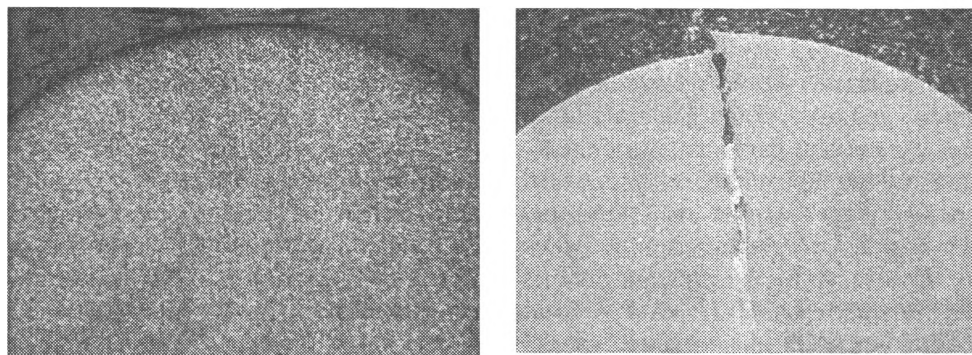


Рис. 4. Линии деформации слоев металла и спиральная трещина в поперечном сечении образца проволоки после скручивания, металлографический шлиф, травление в реактиве Нитал

Из рисунков видно, что линии деформации не совпадают со сжатыми по спирали волокнами, они расположены вдоль оси проволоки. Данный факт показывает, что перемещение слоев вдоль оси проволоки и образование продольных трещин происходит на протяжении всего процесса скручивания. Локальные продольные трещины, возникающие на проволоке уже вначале кручения, далее сжимаются по спирали, в одних случаях остаются локальными, в других — после излома превращаются в магистральную спиральную трещину. На металлографическом шлифе поперечного сечения проволоки после испытаний на скручивание видно радиальное направление деформации (рис. 4).

Получив визуальное подтверждение продольного сдвига при скручивании, образования продольных локальных трещин, принимая во внимание представленную схему напряженного состояния, принята гипотеза образования спиральной трещины от действия продольного сдвигающего напряжения  $\tau_w$ , а изломы со спиральной трещиной и ступенчатые в классификаторе названы по внешнему виду — нормальным со спиральной трещиной и ступенчатым соответственно, а не хрупкими.

Таким образом, излом нормальный со спиральной трещиной (тип 3а, приложение) — плоскость излома перпендикулярна оси проволоки, по всей длине или по большей части длины имеется спиральная трещина. Излом ступенчатый — часть плоскости излома перпендикулярна оси проволоки, часть совпадает со спиралью либо параллельна оси, встречаются как со спиральной трещиной по длине проволоки (тип 3в), так и без нее (тип 2в, приложение). Существенных различий в механических свойствах проволоки и в причинах образования обоих типов ступенчатых изломов не выявлено. Оценка пластических свойств проволоки с изломами типа 3а, 3в, 2в — неудовлетворительно.

Результатом действия основного растягивающего напряжения  $\sigma_1$  является хрупкий излом [1] — плоскость излома расположена под углом  $45^\circ$  к

оси проволоки и под углом  $90^\circ$  к линии скрученных волокон, видимых на проволоке в виде спирали (тип 3г, приложение). Такие изломы характерны для хрупких материалов (чугун, закаленная сталь) [1] и не встречались в процессе исследования волоченой стальной проволоки со структурой пластинчатого перлита. Оценка пластических свойств проволоки из перлитной стали с таким изломом — неудовлетворительно.

В процессе исследования встречались нормальные изломы типа 1, но с локальными продольными трещинами в зоне разрушения либо по длине проволоки. Так как эти трещины не превратились в магистральную трещину расслоения, но тем не менее образовались, можно предполагать, что пластические свойства такой проволоки хуже, чем проволоки с изломом типа 1. Поэтому такие изломы отнесены к типу 2а, промежуточному по пластическим свойствам между нормальным 1 и спиральным 3а. Оценка пластических свойств проволоки — удовлетворительно.

Кроме описанных выше изломов, часто разрушение проволоки происходит с несколькими изломами — один первичный, перпендикулярный оси, один или несколько вторичных, спиральных, магистральной спиральной трещины нет либо она носит локальный характер (только в зоне вторичных изломов) (тип 2б, приложение). Как правило, на этих разрушениях каких-либо существенных отклонений в микроструктуре не наблюдалось, уровень прочности проволоки в большинстве случаев находился выше центра спецификации для каждого диаметра проволоки. Такие изломы вызывали вопросы. Относить их к удовлетворительным результатам скручивания или неудовлетворительным? Являются ли они характеристикой пластических свойств проволоки? Причины их возникновения?

Ответы на эти вопросы и вопросы об определяющих причинах расслоения вообще были получены в процессе исследования разрушений проволоки после скручивания с опытного «зубчатого» маршрута волочения, разработанного Исследовательским центром метизного производства

РУП «БМЗ». «Зубчатый» маршрут отличается от обычного резким перепадом единичных обжатий, применением нескольких волок с малым единичным обжатием, двойных углов деформационной зоны. Волоки с такими параметрами способствуют образованию на поверхности проволоки сжимающих остаточных осевых и окружных напряжений [4]. В результате применения зубчатого маршрута, оптимизации содержания углерода и прочности катанки на РУП «БМЗ» была получена высокопрочная бортовая проволока диаметром 1,83 мм из стали 90 без расслоения. Проволока из стали 90, изготовленная с одинаковым суммарным обжатием, на обычном маршруте расслаивалась, на «зубчатом» — имела нормальный пластичный излом, т.е. сжимающие осевые и окружные остаточные напряжения на поверхности проволоки обеспечивают излом при скручивании без расслоения, растягивающие вызывают расстрой.

При исследовании изломов проволоки после каждой волоки «зубчатого» маршрута 13-кратного стана грубого волочения выявлено, что характер излома меняется несколько раз с постоянной закономерностью. Излом является пластичным типа 1 после первых 6–8 волок, затем с увеличением степени обжатия появляется разрушение с вторичным изломом, затем расслоение, далее после волоки с малым обжатием излом вновь становится пластичным типа 1.

Анализируя виды разрушений от скручивания проволоки после каждой волоки «зубчатого» маршрута, можно предполагать, что разрушения со вторичными изломами являются следствием потери проволокой пластических свойств, нарастания остаточных напряжений, состоянием, близким к полному расслоению.

Вторичный излом образуется в момент, следующий за первичным разрушением. В течение скручивания, как уже ранее упоминалось, происходит продольный и поперечный сдвиг металла. Если при этом образовались продольные локальные трещины, они закручиваются по спирали и сжимаются. После первичного излома сжатая проволока стремится к раскручиванию за счет энергии упругой деформации, появляются дополнительные растягивающие напряжения, которые приводят к вторичному излому на тех участках, где с момента начала кручения образовались достаточно развитые продольные локальные трещины. Вторичный излом является по виду и характеру образования спиральным, хотя первоначально трещины были продольными.

Энергия упругой деформации является мерой остаточных напряжений в материале после дефор-

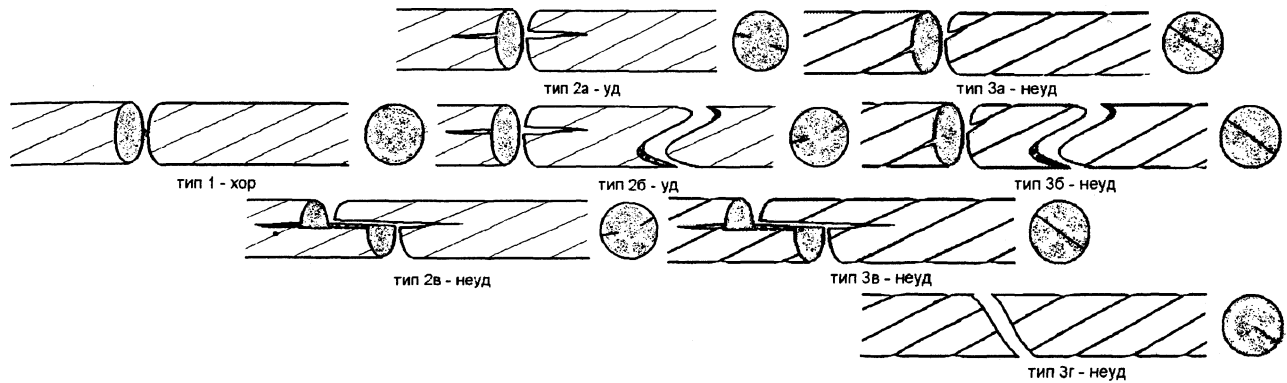
мации [3] и, следовательно, наличие вторичных изломов показывает, что в проволоке имеется некий уровень остаточных растягивающих напряжений, который не вызвал полного расслоения, но свидетельствует о состоянии, близком к полному расслоению, т.е. наличие вторичных спиральных изломов является степенью расслоения проволоки. По этой причине разрушение с вторичными спиральными изломами, локальными спиральными и продольными трещинами отнесено к типу 2б — переходному между пластичным состоянием проволоки и полным расслоением, т.е. средняя степень расслоения, оценка пластических свойств и степени расслоения — удовлетворительно.

Таким образом, в результате проведенных исследований образцов проволоки с изломами, анализа природы расслоения, причин расслоения разработаны классификатор изломов волоченой проволоки из стали с перлитной структурой, критерии и оценка степени расслоения проволоки. Так как выявлена взаимосвязь расслоения при скручивании и остаточных напряжений волочения, то данный классификатор в большинстве случаев (кроме случаев наличия грубых поверхностных дефектов в проволоке) является и косвенной оценкой уровня остаточных напряжений. Для определения причин расслоения, а также в исследовательских работах, когда требуется сравнительная оценка пластических свойств, напряженного состояния и степени расслоения проволоки, при установлении вида излома необходимо использовать увеличительный прибор, так как изломы типа 1 и 2а не всегда можно идентифицировать без увеличения. Обычно удобно использовать  $\times 12$ –25. Для установления пригодности проволоки по параметру «расслоение» классифицировать изломы можно без увеличительных приборов, при этом типы 1 и 2а можно считать равнозначными, приемлемыми с оценкой удовлетворительно. Для определения конкретных причин расслоения в каждом случае необходимо анализировать не только вид излома, но и характеристики проволоки, катанки (механические свойства, химический состав), технологического процесса изготовления проволоки.

### Литература

1. Годецки Л. Явления, связанные с деформацией кручения стальной проволоки, Польша, 1971, WIRE INDUSTRY.
2. Гриднев В.Н., Гаврилюк В.Г., Мешков Ю.А. Прочность и пластичность холоднодеформируемой стали. Киев: Наукова думка, 1974.
3. Битков В.В. Технология и машины для производства проволоки. Екатеринбург, 2004.
4. Перлин И.Л. Теория волочения. М.: Машгиз, 1957.

Типы изломов при скручивании волооченой проволоки из стали с перлитной структурой, критерии и оценка пластичности проволоки



Тип 1 – нормальный излом, проволока ровная, продольных и спиральных трещин нет, плоскость излома перпендикулярна оси проволоки	хорошо
Тип 2 – проволока ровная, слегка волнистая, есть продольные локальные трещины, спиральная трещина начальной степени развития	
2а – нормальный излом, плоскость излома перпендикулярна оси проволоки	уд.
2б – сложный излом, состоит из нескольких изломов разных типов, первичный перпендикулярен оси проволоки, другие совпадают со спиральной линией скручивания волокон	уд.
2в – ступенчатый излом, часть плоскости излома перпендикулярна оси проволоки, часть плоскости излома совпадает со спиральной трещиной	неуд.
Тип 3 – проволока ровная или волнистая, есть продольные локальные трещины, спиральная трещина имеется по всей длине проволоки либо по большей части ее длины	
3а – нормальный излом со спиральной трещиной, плоскость излома перпендикулярна оси проволоки	неуд.
3б – сложный излом, состоит из нескольких изломов разных типов, первичный перпендикулярен оси проволоки, другие совпадают с винтовой линией скручивания волокон	неуд.
3в – ступенчатый излом, часть плоскости излома перпендикулярна оси проволоки, часть плоскости излома совпадает со спиральной трещиной	неуд.
3г – хрупкий излом, плоскость излома расположена под углом 45° и под углом 90° к спиральной линии скручивания волокон	неуд.