

Ю. Л. БОБАРИКИН, С. В. АВСЕЙКОВ, ГГТУ им. П. О. Сухого,
А. В. ВЕДЕНЕЕВ, ОАО «БМЗ - управляющая компания холдинга «БМК»

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБРЫВНОСТИ МЕТАЛЛОКОРДА В ПРОЦЕССЕ СВИВКИ НА КАНАТНЫХ МАШИНАХ ДВОЙНОГО КРУЧЕНИЯ

В результате аналитических и экспериментальных исследований процессов свивки высокоуглеродистой латунированной проволоки определена зависимость, позволяющая комплексно оценивать влияние условий свивки на обрывность металлокорда.

As a result of analytical and experimental studies of processes of the high-carbonaceous brass-plated wire twist the dependence allowing to estimate fully the influence of twist conditions on metal cord breakage is defined.

Производство металлокорда на канатных машинах двойного кручения является наиболее эффективным по сравнению с канатными машинами одинарного кручения по причине более высокой производительности. Однако сложная схема совмещенной пространственной деформации изгиба и кручения проволок на канатных машинах двойного кручения способствует появлению новых технологических видов брака металлокорда. К основным видам брака готового металлокорда можно отнести остаточное кручение металлокорда после свивки, прямолинейность металлокорда после свивки и с течением времени, плотность свивки проволок и др. Другим регламентированным видом качественной характеристики металлокорда является требование по числу сварных соединений по длине. Данный браковочный признак особенно актуален при высоком уровне обрывов проволок в процессе свивки проволоки в металлокорд на машинах двойного кручения.

На обрывность металлокорда в процессе свивки оказывает влияние совместное воздействие режимов свивки и механических свойств свиваемой тонкой проволоки.

По механическим характеристикам тонкой проволоки на существующем уровне развития канатного производства не представляется возможным установить и предсказать обрывность тонкой проволоки в процессе свивки. Известно, что по значению модуля упругости возможно качественно оценить возможность обрывности металлокорда. Причиной этому служит то, что при высоком модуле

упругости в деформированном металле внутренние напряжения возрастают интенсивнее. Тогда достижение предела текучести деформируемого металла происходит при меньшей степени упругой деформации [1].

Результаты, приведенные в [1], показывают, что увеличение значения модуля упругости повышает относительную обрывность металлокорда при условии равенства остальных механических свойств. Эта зависимость носит прямо пропорциональный характер.

В действительности, для различных по диаметру и классу прочности тонких проволок при изменении модуля упругости происходит изменение комплекса механических свойств. В связи с этим комплексное влияние предела прочности и относительного удлинения тонкой проволоки на обрывность металлокорда не изучено.

Пластические свойства тонкой проволоки с учетом ее высокой прочности предложено оценивать по произведению предела прочности и относительного удлинения [2]. Это объясняется изменением величины площади под линией, описывающей соотношение «напряжение-деформация». Тогда, чем выше относительное удлинение при неизменном пределе прочности, тем указанная площадь будет больше. Физический смысл данного явления заключается в том, что площадь под линией, описывающей соотношение «напряжение-деформация», является работой, необходимой для деформирования проволоки до разрушения.

На основании выше изложенного можно сделать заключение о том, что увеличение упругих свойств тонкой проволоки, выраженных модулем упругости, приводит к росту относительной обрывности. Увеличение пластических свойств, выраженных произведением предела прочности и относительного удлинения при растяжении, должно приводить к снижению обрывности. Это предположение можно представить в следующем виде:

$$B = \frac{E}{\sigma_{вр} \delta}, \quad (1)$$

где B – относительная обрывность металлокорда, обр/т; E – модуль упругости Юнга, ГПа; $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление при разрыве, МПа; δ – относительное удлинение при растяжении, %.

Выражение (1) качественно характеризует способность проволоки к свивке, но не позволяет судить о вероятности обрыва проволоки при свивке.

Согласно теории пластического разрушения, обрыв проволоки происходит вследствие выхода дислокаций, возникающих около включений и других неоднородностей, к поверхности проволоки при кручении и изгибе; роста тонких трещин; деформационного разупрочнения и образования полос скольжения; роста дислокаций при их пересечении в случае сложного трехосного деформированного состояния. Согласно деформационному механизму пластического разрушения, можно сделать заключение о том, что такой вид разрушения зависит от истории деформации, отношения диаметра проволоки к расстоянию между включениями, размера не включений [3] и анизотропии свойств проволоки [4].

Как известно, в процессе свивки проволоки изменяются ее механические свойства. Изменение относительного удлинения проволоки δ при свивке является наиболее значительным по сравнению с модулем упругости и пределом прочности [5].

Тогда влияние пластических свойств на обрывность следует интерпретировать как величину изменения относительного удлинения при растяжении свиваемой проволоки. Величину изменения пластических свойств тонкой проволоки при свивке в направлении нагружения, соответствующем деформации при свивке проволоки (изгиб и кручение), можно представить в виде:

$$\Delta = \delta - \varepsilon_{св}, \quad (2)$$

где δ – относительное удлинение проволоки перед свивкой (после тонкого волочения), %; $\varepsilon_{св}$ – деформация свиваемой проволоки, эквивалентная деформации при осевом растяжении, %.

Подставляя величину изменения пластических свойств тонкой свиваемой проволоки (2) в (1), получаем предварительное выражение для расчета относительной обрывности металлокорда:

$$B_{расч} = \frac{E}{\sigma_{вр} (\delta - \varepsilon_{св})}. \quad (3)$$

В связи с тем что деформация при растяжении является одноосной или одномерной, а деформация процесса свивки – трехмерная, то представляется обоснованным перевод одномерной деформации в трехмерную возведением деформационных параметров в третью степень:

$$B_{расч} = \frac{E}{\sigma_{вр} [(\delta)^3 - (\varepsilon_{св})^3]}. \quad (4)$$

В выражении (4) модуль упругости, предел прочности и относительное удлинение при растяжении определяются на основании механических испытаний на растяжение. Значение эквивалентной деформации свивки $\varepsilon_{св}$ определяется численным моделированием процесса свивки металлокорда. Реализация этого расчета основана на использовании метода конечных элементов [6].

В табл. 1 приведены значения основных параметров, определяющих расчетную относительную обрывность $B_{расч}$. Значения модуля упругости, предела прочности и относительного удлинения получены на основании механических испытаний на растяжение. Эквивалентная деформация свивки рассчитана с помощью численной модели процесса свивки приведенного в табл. 1 металлокорда.

Таблица 1. Механические параметры тонкой проволоки

| Металлокорд | Параметры тонкой проволоки | | | |
|----------------|---------------------------------|---|--|--|
| | модуль упругости Юнга E , МПа | временное сопротивление при разрыве $\sigma_{вр}$, МПа | относительное удлинение при разрыве δ , % | эквивалентная деформация свивки $\varepsilon_{св}$, % |
| 2×0,30 НТ | 205700 | 3235,57 | 2,27 | 2,19 |
| 2 + 1×0,30 НТ | 205700 | 3235,57 | 2,27 | 2,13 |
| 2 + 2×0,30 SHT | 202600 | 3376,13 | 2,64 | 2,53 |
| 3 + 2×0,35UT | 190320 | 3725,33 | 2,54 | 1,97 |
| 4 + 3×0,35UT | 190320 | 3725,33 | 2,54 | 2,14 |

На обрывность оказывает влияние схема свивки проволок в металлокорд на канатной машине. Чем сложнее конструкция металлокорда и кинематическая схема канатной машины, тем больше необходимо проволоке преодолеть изгибов и кручений на конструктивных элементах канатной машины, что также повышает вероятность обрыва проволоки в торсионе, где проволока получает максимальную деформацию.

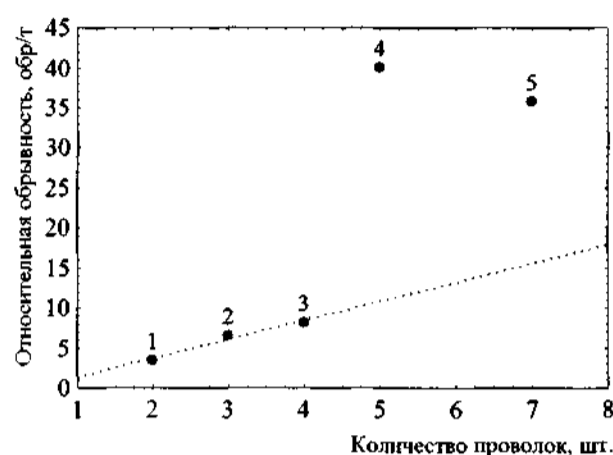


Рис. 1. Распределение относительной обрывности металлокорда в зависимости от количества проволок в металлокорде: металлокорд: 1 – 2×0,30HT; 2 – 2 + 1×0,30HT; 3 – 2 + 2×0,30SHT; 4 – 3 + 2×0,35UT; 5 – 4 + 3×0,35UT

Предположим, что при свивке одного вида проволоки в различные конструкции металлокорда соблюдается условие: увеличение количества проволок в металлокорде прямо пропорционально относительной обрывности.

Для анализа этого предположения была проанализирована производственная статистика (рис. 1).

Из рисунка видно, что для схожих по механическим свойствам кордов 2×0,30HT, 2 + 1×0,30HT 2 + 2×0,30SHT влияние количества проволок на относительную обрывность носит линейный характер в отличие от кордов 3 + 2×0,35UT и 4 + 3×0,35UT, где прочностные свойства резко возрастают. Это доказывает предположение влияния количества проволок в металлокорде на его относительную обрывность – возрастает вероятность обрывов с увеличением числа проволок.

Отклонение от линейной зависимости кордов 3 + 2×0,35UT и 4 + 3×0,35UT можно также объяснить значительным отличием механических свойств тонкой проволоки, марки стали проволоки, кинематической схемы свивки на канатной машине и количества выпущенного металлокорда. Перечисленные параметры в определенной степени влияют на обрывность металлокорда.

В табл. 2 представлены статистические данные изготавливаемого в промышленных условиях металлокорда.

По данным, приведенным в таблице, можно предположить, что с увеличением количества проволок в металлокорде относительная обрывность должна возрастать прямо пропорционально. Однако нелинейность этой зависимости свидетельствует о том, что на среднее значение относительной обрывности оказывают влияние другие параметры. В действительности, на обрывность также оказы-

Таблица 2. Влияние обрывности проволок в зависимости от конструкции металлокорда

| Металлокорд | Относительная обрывность, обр/т | Выпуск N, т | Количество проволок, шт. | Марка стали проволоки |
|----------------|---------------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------|
| 2×0,30 HT | 3,47 | 11342,54 | 2 | Сталь 80 |
| 2 + 1×0,30 HT | 6,55 | 1175,54 | 3 | |
| 2 + 2×0,30 SHT | 8,23 | 646,565 | 4 | |
| 3 + 2×0,35UT | 40,06 | 13,35 | 5 | Сталь 96 |
| 4 + 3×0,35UT | 35,78 | 113,51 | 7 | |

вает влияние схема свивки проволок в металлокорд на канатной машине. Количественное влияние кинематической схемы канатной машины и количества проволок в конструкции металлокорда на относительную обрывность предлагается оценивать коэффициентом $K_{кин}$.

Величина относительной обрывности должна изменяться с ростом выпуска металлокорда. Это объясняется зависимостью среднего значения относительной обрывности от величины выборки или выпуска металлокорда. Количественное влияние величины выборки на относительную обрывность предлагается оценивать коэффициентом K_N .

В связи с высоким содержанием углерода в стали температура ее обработки будет существенно влиять на механические свойства. Это связано с явлением деформационного старения проволоки при волочении. Интенсивность роста прочности стали при волочении пропорциональна увеличению содержания углерода, что количественно определяется коэффициентом K_T .

В итоге, выражение (4) с учетом приведенных выше предположений принимает окончательный вид:

$$B_{расч} = \frac{E}{\sigma_{вр} [(\delta)^3 - (\epsilon_{св})^3]} \frac{K_{кин} K_T}{K_N}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости Юнга, ГПа; $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление при разрыве, МПа; δ – относительное удлинение перед свивкой, %; $\epsilon_{св}$ – максимальная деформация проволоки в процессе свивки, %; $K_{кин}$ – коэффициент, учитывающий кинематическую сложность свивки металлокорда; K_T – коэффициент, учитывающий температурную чувствительность пластических свойств свиваемой проволоки в зависимости от марки стали; K_N – коэффициент, учитывающий объем выпуска металлокорда.

Значения коэффициентов, входящих в формулу (5), определены на основе математического анализа производственных статистических данных.

Определено, что для свиваемого металлокорда из проволоки диаметром d на канатных машинах TD2/401 и TD2/202 коэффициент $K_{кин}$ равен: для

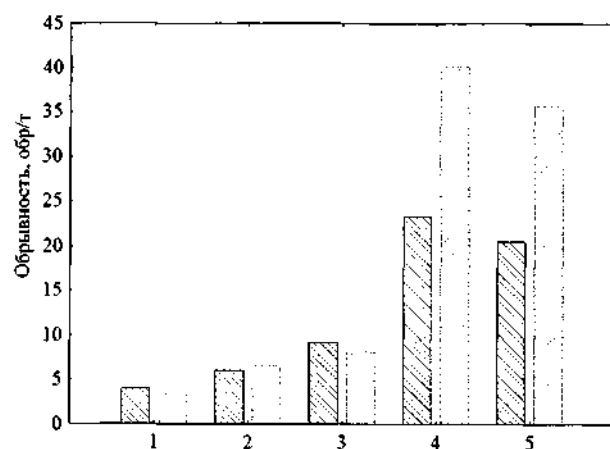


Рис. 2. Сравнение расчетных значений относительной обрывности исследуемых металлокордов: 1 – 2×0,30HT; 2 – 2 + 1×0,30HT; 3 – 2 + 2×0,30SHT; 4 – 3 + 2×0,35UT; 5 – 4 + 3×0,35UT (синий цвет – расчетные значения; красный – производственная статистика)

металлокорда 2×d HT – 1,2, для металлокорда 2 + 1×d HT – 2,4 и для металлокорда 2 + 2×d SHT – 3,8; для канатных машин Ri-10 BM: для металлокорда 3 + 2×d UT – 9, для металлокорда 4 + 3×d UT – 11.

Определено, что коэффициент K_T для проволоки из стали 80 равен 1, для стали 96 – 2.

Определено, что коэффициент, учитывающий объем выпуска металлокорда, можно рассчитать по формуле:

$$K_N = 4 \lg(N), \quad (6)$$

где N – выпуск металлокорда, т.

Для оценки адекватности полученной зависимости (6) было проведено сравнение расчетных значений относительной обрывности $V_{расч}$ исследуемых видов металлокорда, полученных по формуле (5), с производственной статистикой по обрывности. Результаты сравнения приведены на рис. 2.

Из рисунка видно, что средняя погрешность в определении расчетной относительной обрывности составляет около 12% в сравнении со значениями относительной обрывности металлокорда в условиях промышленного производства. С учетом большого количества факторов, влияющих на обрывность металлокорда, можно признать расчетную ошибку допустимой и пригодной для промышленного использования.

Таким образом, в результате аналитических и экспериментальных исследований процессов свивки высокоуглеродистой латунированной проволоки определена зависимость, позволяющая комплексно оценивать влияние условий свивки на обрывность металлокорда. Зависимость может быть полезна при оценке влияния на обрывность изменений условий свивки, изменений свойств металла, а также для оценки прогнозной обрывности при организации производства новых видов металлокорда.

Литература

1. Способ отбора партий стальной высокоуглеродистой проволоки для свивки металлокорда с минимальной обрывностью: Пат. 15384 Респ. Беларусь, МПК G 01N 3/08, G 01N/28 / В. В. Крылов-Олефиренко, А. И. Гордиенко, А. В. Веденеев, О. И. Игнатенко, А. Н. Савенок; заявитель РУП «БМЗ». № а 20081133; заявл. 02.09.2008; опубл. 07.10.2011;
2. Способ изготовления высокопрочной сверхтонкой металлической проволоки с хорошим балансом прочность/пластичность: Пат. 2008-208450 Япония / Такахаси Ацуси, Косака Макото, Таруи Тосидзо; заявитель Син Ниппон Сэйтэцу Кабусикигайся Токё-то, Тиёда-ку. № 2007-213887; заявл. 20.08.2007; опубл. 11.09.2008;
3. Бирюков Б. А., Феоктистов Ю. В., Игнатъев С. Н. Расчеты параметров свивки металлокорда. Мн.: Белорганкопромиздат, 1996.
4. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Металлургия, 1971.
5. Бобарикин Ю. Л. Влияние режимов волочения на пластические характеристики тонкой углеродистой латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков // Сб. науч. тр. В 3-х кн. Кн. 3. Обработка металлов давлением. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. С. 14-24.
6. Бобарикин Ю. Л. Численное моделирование процесса свивки металлокорда с использованием метода конечных элементов / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, С. В. Авсейков, А. В. Веденеев, Е. В. Шамановская // Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 40-44.