

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБРЫВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВИВКЕ В МЕТАЛЛОКОРД

УО “Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого”
г. Гомель, Беларусь

Производство металлокорда с низкой обрывностью при свивке на сегодняшний день является важной производственной задачей. Решение данной задачи получено путем определения влияния на обрывность металлокорда режимов деформации стальной высокоуглеродистой проволоки в процессе ее свивки в металлокорд.

Численным моделированием определен количественный параметр “эквивалентная деформация свивки” $\epsilon_{св}$, характеризующий деформацию проволоки в процессе свивки. Показано, что максимальные значения $\epsilon_{св}$ концентрируются на поверхности проволоки. Распространение $\epsilon_{св}$ к центру поперечного сечения проволоки зависит от величины дополнительного подкручивания.

Установлено, что в процессе свивки превышение $\epsilon_{св}$ на поверхности проволоки значения относительного удлинения проволоки δ повышает вероятность ее обрывности.

Manufacture steel cord with low breakage on the twist process for today is an important industrial problem. The solution of the given problem is gained by agency definition on breakage steel cord regimes of deformation high carbon steel wire on the twist process of it in steel cord.

Quantitative parameter “equivalent deformation of twist” $\epsilon_{св}$ is defines by numerical modeling and characterises wire deformation on twist process. It is shown that the maximum values $\epsilon_{св}$ concentrate on wire surfaces. Extending $\epsilon_{св}$ to the centre of a wire cross-section depends on magnitude additional torsion.

It is installed that on twist process excess $\epsilon_{св}$ on a surface of a wire value of a percentage elongation of wire δ raises its probability breakage.

Металлокорд изготавливают на канатных машинах двойного кручения последовательной скруткой тонкой латунированной высокоуглеродистой стальной проволоки. Металлокорд является основным армирующим элементом резинотехнических изделий и преимущественно автомобильных шин. В результате свивки в металлокорд проволока деформируется в объемную

спираль с регламентируемым периодом, называемым шагом металлокорда (t).

Качество металлокорда должно соответствовать основным технологическим требованиям. К основным видам технологических требований к металлокорду относят: диаметр металлокорда, его агрегатная прочность, сила сцепления с резиной, прямолинейность, нераскручиваемость и шаг металлокорда.

Диаметр металлокорда, агрегатная прочность, сила сцепления с резиной зависят от свойств проволок и от их расположения в металлокорде.

Нераскручиваемость металлокорда обеспечивается дополнительным подкручиванием пряди в торсионном устройстве (рис. 1). Подкручивание позволяет получить пластическую деформацию в проволоке. После дополнительного подкручивания шаг металлокорда несколько увеличивается и далее раскручивается в обратном направлении в области упругих деформаций. Величина дополнительного подкручивания металлокорда создается вращением торсионного устройства, которое должно вращаться с частотой, превышающей частоту лопаточных тазов [1]. Угол закручивания металлокорда формирует его шаг (t) регулировкой отношения угловой скорости лопаточных тазов (3) к поступательной скорости проволок (2).

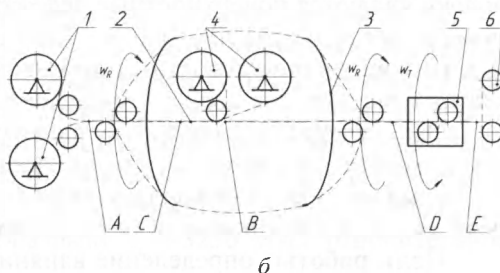


Рис. 1. Устройство канатной машины двойного кручения:

а — канатная машина TD2/202, б — кинематическая схема:

1 — внешние питающие катушки с проволокой, 2 — прядь,

3 — лопаточные тазы, 4 — внутренние питающие катушки,

5 — торсион, 6 — вытяжной кабестан

Для формирования стабильной нераскручивающейся конструкции металлокорда и для отсутствия обрыва необходимо,

чтобы проволока металлокорда обладала достаточным уровнем запаса пластических свойств и выдерживала максимально возможные деформации в процессе свивки. В производственных условиях при отлаженном технологическом процессе среднее количество обрывов составляет 1–15 обрывов на 1 тонну изготовленного металлокорда, что снижает качество металлокорда и производительность свивки.

В этом случае причинами обрывов являются случайные факторы, приведенные на рис. 2. Обрыв одной проволоки составляет 75 % от числа всех обрывов [2]. Производственная статистика причин обрывов проволоки при свивке кордов 2×0,30НТ, 2+1×0,30НТ, 2+2ШНТ, 3+2×0,35УТ, 4+3×0,35УТ на канатных машинах двойного кручения показана на рис. 2.

Анализ производственной статистики (рис. 2) обрывов проволоки показывает, что основными причинами обрыва проволоки являются поверхностные дефекты проволоки и расслой поверхностного слоя проволоки. Основной причинной появления этих видов поверхностных дефектов следует считать недостаток пластических свойств проволоки.

Обеспечение безобрывного производства металлокорда на сегодняшний день является важной производственной задачей. На обрывность металлокорда влияют пластические свойства и режимы свивки проволоки в металлокорд.

Цель работы: определение влияния свойств проволоки и режимов свивки на обрывность металлокорда.

Для анализа обрывности металлокорда принята деформационная теория разрушения. В соответствии с этой теорией можно принять следующее положение: разрушение проволоки в процессе свивки происходит в случае деформирования проволоки выше значения относительного удлинения проволоки (δ), что приведет к обрыву и остановке канатной машины. Тогда

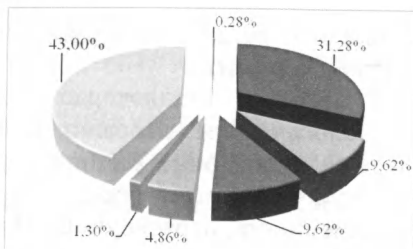


Рис. 2. Причины обрывов проволоки при свивке в металлокорд:
Неметаллические включения — 0,28 %;
поверхностные дефекты — 31,28 %;
осевые трещины — 9,62 %;
сужение — 9,62 %; сварка — 4,86 %;
кручение — 1,30 %; расслой — 43,00 %

для оценки возможности появления обрыва можно рассчитать значение эквивалентной деформации проволоки при свивке в металлокорд ($\epsilon_{\text{св}}$) и сравнить эту величину со значением δ . В результате возможность появления обрыва может оцениваться разницей между δ и $\epsilon_{\text{св}}$: чем меньше $\epsilon_{\text{св}}$ по отношению к δ , тем меньше вероятность обрыва, и наоборот.

Сложность трехмерного деформированного состояния проволок в процессе свивки не позволяет определить деформированное состояние проволок аналитическими методами [3], поэтому использовалась численное моделирование свивки проволок в металлокорд, основанное на методе конечных элементов (МКЭ). Численная модель свивки металлокорда [4] позволяет определить значения эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{\text{св}}$) проволок металлокорда в зависимости от режимов свивки на канатных машинах двойной свивки.

Численное моделирование деформированного состояния проволок позволяет определить количественные значения деформации ($\epsilon_{\text{св}}$) эквивалентной осевому растяжению и сравнить с относительным удлинением проволоки (δ). Натурные испытания на скручивание позволяют смоделировать условия, при которых происходит разрыв проволоки.

Исходные материалы для исследований: проволока для металлокорда, изготовленная последовательным волочением проволоочной высокоуглеродистой латунированной заготовки диаметром 1,77 мм до готовой тонкой проволоки диаметром 0,30 мм на станах тонкого волочения со скольжением со скоростью волочения в последней волоке 16 м/с. Стандартными испытаниями на осевое растяжения определены механические свойства тонкой проволоки: модуль упругости Юнга $E = 205700$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 3077$ МПа, временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 3236$ МПа, относительное удлинение $\delta = 2,27$ %.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 3 показаны результаты численного моделирования деформированного состояния металлокорда на канатной машине TD2/202 в процессе свивки в металлокорд 2×0,30НТ. Эквивалентная деформация свивки ($\epsilon_{\text{св}}$) характеризует относительное удлинение объема проволоки (конечного элемента) расположенного на поверхности проволоки металлокорда.

Анализ рис. 3 показывает, что максимальная деформация свивки на поверхности соответствует дополнительной подкрутке в торсионном устройстве (позиция 5, рис. 1).

Определение влияния запаса пластических свойств на обрывность металлокорда $2 \times 0,30 \text{ НТ}$ в зависимости от режима свивки проволок проводили на лабораторном стенде (рис. 4). На лабораторном стенде был изготовлен фрагмент металлокорда $2 \times 0,30 \text{ НТ}$ представленный на рис. 5. Изготовление фрагмента металлокорда происходило в следующей последовательности. Для формирования в металлокорде $2 \times 0,30 \text{ НТ}$ требуемого шага свивки ($t = 14 \text{ мм}$) проволока подкручивается до предварительного шага $t_0 = 14 \text{ мм}$, затем прядь докручивается до максимального шага свивки $t_{\text{max}} = (1,5-2,5) \cdot t_0$ (имитируя торсионное устройство) и снова раскручивают до готового шага свивки металлокорда $t_{\text{МК}} = 14 \text{ мм}$. Величина дополнительной подкрутки определяется опытным путем в зависимости от величины остаточных упругих напряжений, раскручивающих корд после свивки.

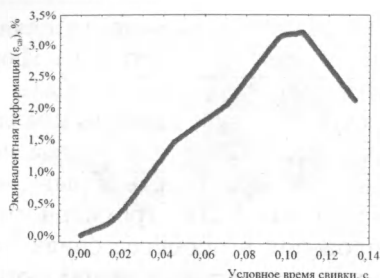


Рис. 3. Изменение эквивалентной деформации свивки на поверхности свиваемой проволоки в металлокорд $2 \times 0,30 \text{ НТ}$

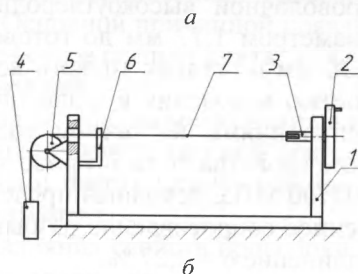
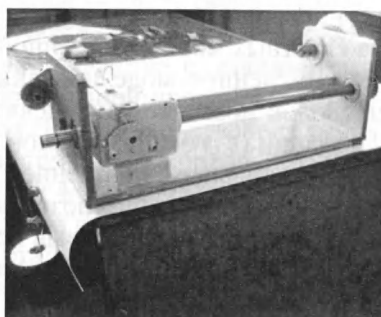


Рис. 4. Лабораторный стенд для свивки проволоки:
 а — лабораторный стенд;
 б — кинематическая схема
 1 — станина, 2 — маховик,
 3 — зажим, 4 — груз, 5 — ролик,
 6 — шаблон, 7 — проволока



Рис. 5. Образцы металлокорда 2×0,30НТ:

№ 1 — промышленный образец; № 2 — экспериментальный образец

Для моделирования свивки проволоки с меньшим запасом пластических свойств использовали прием дополнительной свивки проволоки. Он состоял в увеличении количества дополнительных оборотов на лабораторном стенде (табл. 1) по сравнению с технологией изготовления аналогичного корда в промышленных условиях.

Нагружение кручением проволок в металлокорд 2×0,30НТ на лабораторном стенде проводилась в соответствии с табл. 1.

Табл. 1

Схема нагружения проволок в металлокорд 2×0,30НТ

№ опыта	Предварительная свивка		Дополнительная свивка	
	Количество основных оборотов (n), шт.	Шаг свивки (t), мм	Количество дополнительных оборотов (n_d), шт.	Шаг свивки (t_{max}), мм
1	20	14	10	9,3
2	20	14	15	8
3	20	14	20	7

Из табл. 1 видно, что увеличивая количество дополнительных оборотов (n_d) уменьшается шаг свивки, что способствует большей деформации проволоки.

Далее нагружение проволок по табл. 1 далее моделировалось с использованием численной модели. Определение численных значений деформированного состояния проволок при свивке в металлокорд 2×0,30НТ на лабораторном стенде произведено с использованием численного моделирования. Условия свивки для численного моделирования проволок в металлокорд 2×0,30НТ соответствуют схеме свивки в табл. 1.

На рис. 6 представлены результаты численного расчета эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{св}$) на фрагменте металлокорда длиной 12 мм.



Рис. 6. Сравнение деформированного состояния металлокорда:
Схемы свивки $n+n_0$: а — 20 + 10 ; б — 20 + 15 ; в — 20 + 20

Анализ рис. 6 показывает, что с увеличением дополнительного подкручивания и уменьшением шага свивки на поверхности проволоки образуется выраженная область максимальной эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{св}$), которая превышает значение относительной деформации удлинения при растяжении (δ) для второго и третьего опыта. В области деформации, превышающей критическое значение относительного удлинения, образуются микротрещины, которые при дальнейшей деформации выражаются в макротрещину [5]. Такая трещина развивается на поверхности проволоки по ее длине, а также к центру проволоки. На рис. 7 показано распределение эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{св}$) в опыте № 3.

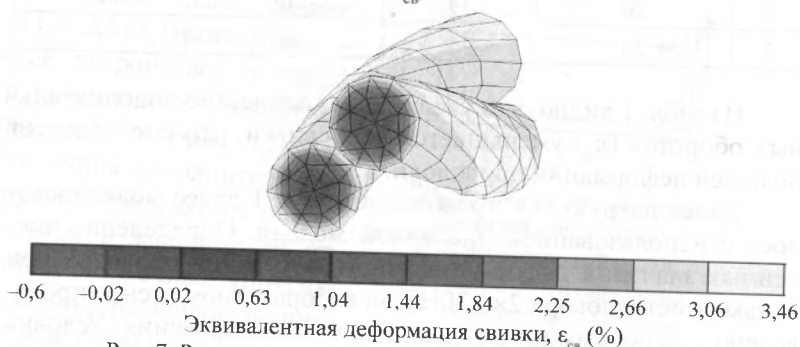


Рис. 7. Распределение эквивалентной деформации свивки по сечению металлокорда 2×0,30НТ в опыте № 3

Анализ распределения по сечению металлокорда эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{св}$) представленного на рис. 7 показывает, что максимальные значения эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{св}$) концентрируются на поверхности проволоки, а степень проникновения к центру проволоки зависит от величины дополнительного подкручивания.

На рис. 8 показан фрагмент свитых проволок с выраженным расслоением поверхностного слоя, полученный с помощью электронной микроскопии.

Анализ рис. 8 показывает, что расслоение поверхностного слоя проволоки при свивке соответствует форме и направлению концентрации максимальной деформации проволоки, что доказывает адекватность численного моделирования и возможность использования теории предельной деформируемости для объяснения механизма разрушения проволоки в процессе свивки.

На рис. 9 представлено распределение значений эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{св}$) по сечению проволоки 0,30 НТ в каждом опыте (табл. 1).

Анализ представленных на рис. 5 графиков показывает, что эквивалентная деформация свивки ($\epsilon_{св}$) близкая и превышающая по значениям критическую деформацию (δ) (красная пунктирная горизонтальная линия), распределена в поверхностных слоях проволоки. При этом в трех опытах разрыва проволоки не происходит. Но превышение деформаций ($\epsilon_{св}$) величину (δ) приводит к зарождению

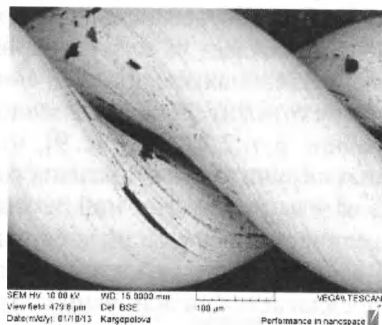


Рис. 8. Фрагмент свитых проволок

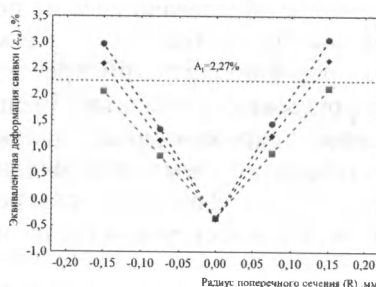


Рис. 9. Распределение эквивалентной деформации 1 свивки по сечению проволоки 0,30НТ: Схемы свивки $n+n_0$: № 1 — 20 + 10; № 2 — 20 + 15; № 3 — 20 + 20

трещин в поверхностных слоях и распространению уже имеющихся микротрещин на поверхности проволоки. Вероятность разрушения проволоки будет возрастать с увеличением ее диаметра (рис. 9), так как с увеличением диаметра эквивалентная деформация свивки ($\epsilon_{св}$) возрастает. В первом опыте эквивалентная деформация свивки ($\epsilon_{св}$) не превышает значение относительного удлинения (δ) проволоки при растяжении (рис. 9). В этом опыте при 50 реверсивных скручиваниях обрыв не происходит, что показывает на низкую вероятность обрыва. Во втором опыте эквивалентная деформация свивки ($\epsilon_{св}$) превышает на 0,5 % значение относительного удлинения (δ) проволоки при растяжении, равное $\delta = 2,27$ % (рис. 9), что снижает количество реверсивных скручиваний в 5 раз по сравнению с опытом № 1. В третьем опыте $\epsilon_{св}$ превышает на 1 % значение δ . Это приводит снижению количества реверсивных скручиваний проволоки в 25 раз.

Оценивать вероятность разрушения проволоки при свивке предлагается на основании результатов испытаний на реверсивное скручивание двух проволок до разрушения на лабораторном стенде. При испытаниях проволоки на реверсивное скручивание образовавшиеся на поверхности проволоки микротрещины будут объединяться в макротрещины, а при изменении направления кручения трещина раскрывается, что приводит к разрушению проволоки. Предполагается, что количество реверсивных скручиваний проволоки эквивалентно вероятности возникновения обрыва проволоки при свивке в металлокорд.

В табл. 2 представлены результаты испытаний проволок на реверсивное скручивание на экспериментальном стенде.

Табл. 2

Результаты испытаний на экспериментальном стенде

№	Схема свивки $n+n_0$	Количество реверсивных скручиваний (циклов) без разрушения (R_{rev})		
		свыше 50	свыше 50	свыше 50
1	20+(+10/-10)	свыше 50	свыше 50	свыше 50
2	20+(+15/-15)	9,3**	10,2**	9,8*
3	20+(+20/-20)	1,8*	1,4*	1,9*

Примечания: знак «+» в скобках означает, что направление вращения дополнительных оборотов соответствует направлению вращения основных оборотов свивки; знак «-» означает, что направление вращения дополнительных оборотов, соответствует противоположному

направлению вращения основных оборотов свивки; знак «*» означает, что при кручении оборвалась одна проволока; знак «**» означает, что при кручении оборвались две проволоки.

Анализ результатов табл. 2 показывает, что в опыте № 3 происходит резкое снижение количества реверсивных скручиваний (R_{rev}) проволоки металлокорда $2 \times 0,30$ НТ. Это указывает на влияние повышения количества дополнительных оборотов при свивке на повышение обрывности металлокорда. Недостаточные пластические свойства проволоки могут привести к преждевременному разрушению ее даже при благоприятных условиях свивки.

На рис. 10 представлен вид обрыва проволоки диаметром 0,30 мм при свивке на экспериментальном стенде в опыте № 3 табл. 2.



Рис. 10. Обрыва тонкой проволоки при свивке в металлокорд

Анализ рис. 10 показывает, что обрыв проволоки при свивке произошел вследствие образования трещины на поверхности проволоки и дальнейшего ее развития вдоль и к центру проволоки.

Выводы

Доказано, что вероятность обрыва проволоки при свивке в металлокорд оценивается разницей между относительным удлинением проволоки δ и эквивалентной деформации проволоки при свивке $\epsilon_{св}$: чем меньше $\epsilon_{св}$ по отношению к δ , тем меньше вероятность обрыва.

Для металлокорда $2 \times 0,30$ НТ превышение эквивалентной деформации свивки ($\epsilon_{св}$) значения относительного удлинения (δ) проволоки при растяжении на 0,5 % повышает вероятность обрыва в 5 раз. При превышении эквивалентной деформации $\epsilon_{св}$ значения δ на 1 % вероятность обрыва проволоки увеличивается в 25 раз.

Список использованных источников

1. Цыбулина, А.А. Производство металлокорда / А.А. Цыбулина, А.К. Стариков. — Москва; Металлургия, 1979. — 64 с.
2. Снижение обрывности высокопрочной проволоки при свивке из нее металлокорда на машинах двойного кручения / Б.А. Бирюков, Ю.В. Феоктистов, А.В. Веденеев // *Литье и металлургия* — 2012. — № 4. — С. 29–34.
3. Анализ деформаций элементов витых структур и их влияние на потери прочности при производстве металлокорда / А.В. Веденеев, А.С. Желтков, В.В. Филиппов // *Вести национальной академии наук Беларуси* — 2000. — № 3. — С. 23–27.
4. 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.
5. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел / Т. Екобори, перевод с английского К.С. Чернявского, под редакцией В.С. Ивановой. — Москва; Металлургия, 1971. — 265 с.

Статья поступила в редакцию 02.05.2014 г.