



The deformation criterion of assessment for optimization of the wire drawing routes of thin high-carbon wire, enabling to increase plastic properties of wire is offered.

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

УДК 621.778.073

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ

Многokратное волочение проволоки основано на последовательном деформировании одной проволочной заготовки в нескольких волоках, обеспечивающих постепенное уменьшение диаметра проволоки по мере ее перемещения от первой к последней волоке. Деформация проволоки в одной волоке составляет один переход волочения. Маршрут волочения металлической проволоки представляет собой последовательность диаметров волок, формирующих диаметр проволоки по переходам волочения. Расчет обжатий при волочении высокоуглеродистой проволоки обоснован выполнением основного условия волочения: предел текучести проволоки на выходе из волоки должен быть ниже усилия волочения, прикладываемого к проволоке на выходе из волоки от тянущего устройства. Величина обжатий по переходам волочения должна быть согласована с кинематическими особенностями волочильного стана.

Маршрут волочения обеспечивает не только последовательное приближение диаметра проволоки к конечному диаметру, но и формирует механические свойства проволоки, влияет на энергопотребление процесса, износ рабочих каналов волок, эксплуатационные свойства смазочных и охлаждающих материалов и др. Под оптимизацией маршрута волочения понимается определение такой последовательности диаметров волок, которая приводит к положительным изменениям перечисленных факторов. В данной работе рассматривается вопрос об оптимизации маршрута волочения с точки зрения получения таких механических свойств проволоки, которые обеспечивают повышение технологичности ее дальнейшей переработки в металлокорд с помощью операции свивки при условии отсутствия негативных последствий на другие

факторы волочения. Под технологичностью такой переработки понимают уровень обрывности проволочек при их сложной деформации при свивке, значение прямолинейности металлокорда после свивки и другие параметры.

Анализ причин снижения технологичности переработки проволоки в металлокорд позволил обратить внимание на связь деформаций проволоки при волочении с технологичностью ее свивки в металлокорд.

Как известно, процесс волочения характеризуется неравномерностью деформаций по сечению проволоки. Избыточные растягивающие напряжения на поверхности проволоки приводят к снижению пластических свойств проволоки в целом. Неравномерность деформации является также источником возникновения остаточных напряжений и деформаций, ухудшающих прямолинейность проволоки и металлокорда. В идеальном случае неравномерность деформации должна отсутствовать, а в реальном – должна быть минимизирована.

Распределение деформации в проволоке в очаге деформации в каждой волоке различно. По мере продвижения проволоки к последней волоке неравномерность деформации повышается.

Формирование в проволоке высокого градиента неравномерной деформации негативно сказывается на пластических свойствах проволоки и является причиной появления остаточных напряжений, которые снижают технологичность свивки проволоки в металлокорд.

Как видно из рис. 1, площадь внутреннего слоя S_1 проволоки в 3 раза меньше площади поверхностного слоя S_2 . Следовательно, переупрочненный поверхностный слой проволоки, имеющий толщину, равную $R/2$, будет вызывать большие со-

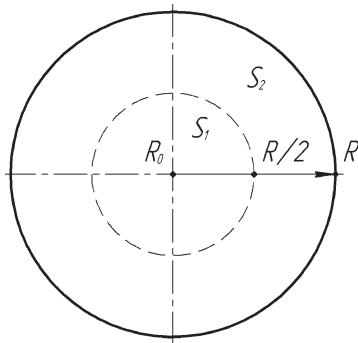


Рис. 1. Схема поперечного сечения проволоки

противление внутреннего слоя и тем выше будут остаточные напряжения в проволоке. Для снижения сопротивления внутреннего слоя проволоки следует уменьшить толщину переупрочненного слоя. Таким образом, внутренние слои сопротивляются меньше. Уменьшение толщины поверхностного переупрочненного слоя проволоки позволит увеличить ее прямолинейность (вследствие снижения остаточных напряжений) и повысит пластические свойства.

На рис. 2 показано распределение пластической деформации в поперечном сечении тонкой проволоки радиусом R для двух вариантов маршрутов волочения. Для оценки неравномерности пластической деформации предлагается использовать принцип, который наилучшим образом отражает одновременно разность деформаций между поверхностными и внутренними слоями проволоки, а также форму кривой действительного рас-

пределения накопленной истинной пластической деформации (рис. 2), определяемого с помощью численного моделирования [1]. Принцип оценки формирования неравномерности деформаций в процессе тонкого волочения в проволоке предлагается оценивать деформационным критерием:

$$K_\epsilon = \frac{2(\epsilon_{R/2} - \epsilon_0)}{\epsilon_R - \epsilon_0}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – величина накопленной истинной пластической деформации в центре поперечного сечения проволоки соответствует минимальному значению деформации; $\epsilon_{R/2}$ – величина накопленной истинной пластической деформации на расстоянии, равном половине радиуса окружности поперечного сечения деформируемой проволоки; ϵ_R – величина накопленной истинной пластической деформации в поверхностных слоях поперечного сечения проволоки соответствует максимальному значению деформации.

Проводя одновременно анализ выражения (1) и рис. 2, можно отметить, что в основе деформационного критерия лежит сравнение значений деформации на расстоянии, равном половине радиуса окружности поперечного сечения деформируемой проволоки $\epsilon_{R/2}$, со средними значениями пластической деформации $\epsilon_{\text{ср.теор}}$, полученными как среднее от теоретической суммы минимальной $\epsilon_{\text{min}} = \epsilon_0$ и максимальной деформации $\epsilon_{\text{max}} = \epsilon_R$ в сечении проволоки. Таким образом, как видно из рисунка, при изменении распределения деформа-

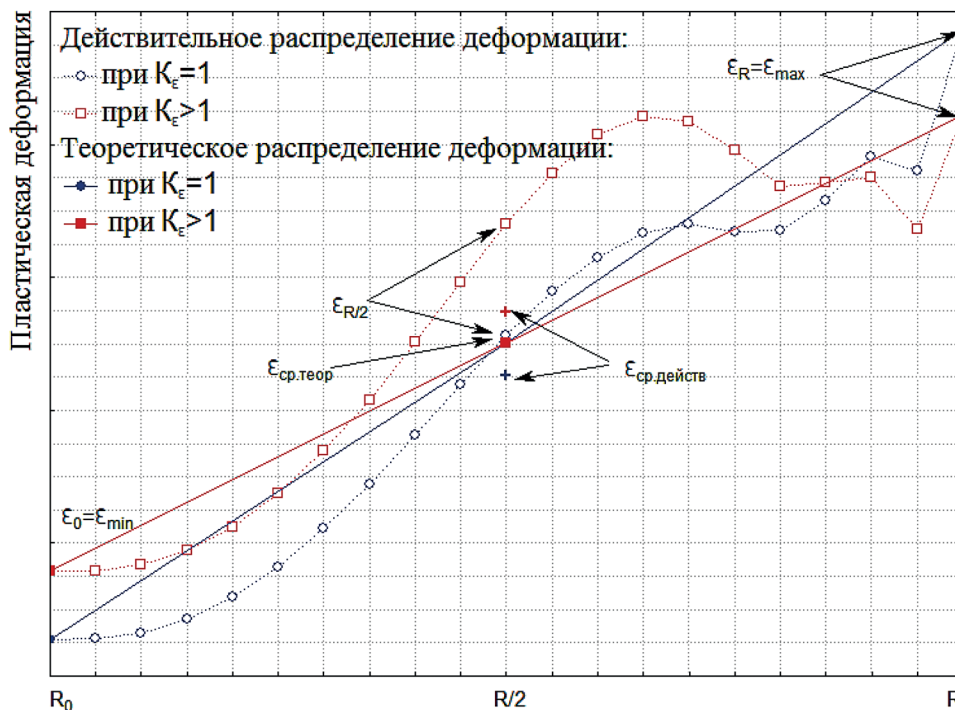


Рис. 2. Распределение накопленной истинной эквивалентной пластической деформации по радиусу поперечного сечения тонкой проволоки после волочения

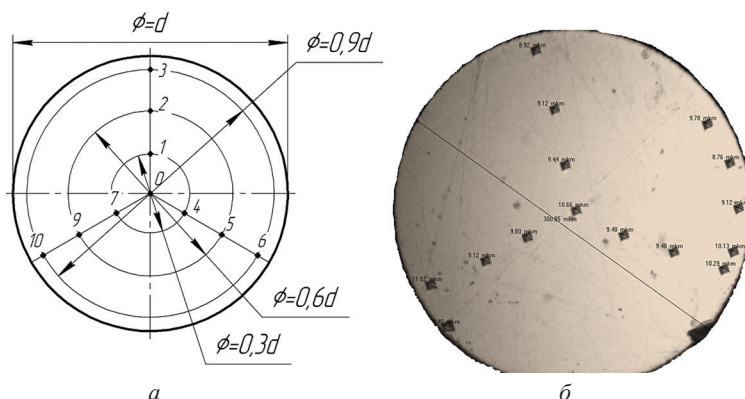


Рис. 3. Определения микротвердости в поперечном сечении проволоки $d = 0,35$ мм: *a* – схема внедрения микроиндентора в образец проволоки; *б* – сечение образца проволоки после измерения микротвердости

ции по сечению проволоки значение $\varepsilon_{\text{ср.теор}}$ не изменяется. Изменяется в значительной степени значение $\varepsilon_{R/2}$ в сравнении со значениями средней деформации $\varepsilon_{\text{ср.действ}}$, полученными как среднее значение от действительной суммы всех значений на кривой распределения деформации по отношению к $\varepsilon_{\text{ср.теор}}$.

Так как деформационная неравномерность одновременно с суммарной степенью деформации проволоки возрастает от перехода к переходу маршрута волочения, то, представляя значения $\varepsilon_{R/2}$ и $\varepsilon_{\text{ср.теор}}$ относительно значений $\varepsilon_{\text{min}} = \varepsilon_0$, в каждом переходе волочения будет определена степень неравномерности деформации в поперечном сечении проволоки в каждом переходе и изменение относительно остальных переходов маршрута волочения.

Используя деформационный критерий, представляется возможным корректировка параметров маршрута волочения для улучшения распределения пластической деформации по сечению готовой тонкой проволоки. Равномерное распределение деформации будет способствовать снижению остаточных напряжений и позволит повысить пластические свойства тонкой проволоки.

С целью экспериментального анализа неравномерности деформации по сечению проволоки при волочении использовали метод определения микротвердости металла в разных точках поперечного сечения тонкой проволоки.

Микротвердость по поперечному сечению проволоки определяли проведением испытаний на микротвердомере ПМТ-3 по вдавливанию микроиндентора в поперечное сечение проволоки согласно [2]. На рис. 3, *a* показана схема контрольных точек для измерения микротвердости проволоки, а на рис. 3, *б* – образец тонкой проволоки с отпечатками после внедрения микроиндентора для определения распределения микротвердости в поперечном сечении проволоки.

Значение твердости по Виккерсу вычисляют по формуле [3]:

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha / 2)}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2}, \quad (2)$$

где F – нагрузка, Н; P – нагрузка, кгс; α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° ; d – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

В результате испытания образцов на микротвердость были получены значения микротвердости, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Значения микротвердости для образцов проволоки в поперечном сечении

Номер образца	Диаметр проволоки, мм	Нагрузка, Н	Значение микротвердости HV, ед.			
			центр, $d = 0$	$d = 0,3\emptyset$	$d = 0,6\emptyset$	$d = 0,9\emptyset$
1	0,35	0,05	1089,4	861,2	929,8	1004,9
				931,7	747,6	1004,9
				1089,4	929,7	544,6
Среднее значение			1089,40	960,77	869,03	851,47

В соответствии с [2, 4] значения микротвердости могут использоваться для определения механических характеристик исследуемых образцов. Это дает возможность с помощью измерения микротвердости сечения проволоки оценить характер распределения механических свойств металла в сечении проволоки. Полученные экспериментальные распределения могут являться качественным доказательством адекватности численных расчетов.

В зависимости от микротвердости уравнение для расчета пластичности имеет вид [4]:

$$\delta = 1 + \frac{1}{\sin \gamma \ln(\sin \gamma)} (1 - \nu - 2\nu^2) \frac{HV}{E}, \quad (3)$$

где γ – угол между осью пирамиды (индентора) и ее гранью, для пирамидального индентора Вик-

керса $\gamma = 68^\circ$; ν – коэффициент Пуассона для данного материала (сталь 80), $\nu = 0,29$; E – модуль Юнга, $E = 205\,000$ МПа; HV – твердость по Виккерсу, ед.

В соответствии с формулой (3) был произведен расчет пластичности для исследуемых образцов. Полученные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения пластичности для образцов проволоки в поперечном сечении

Номер образца	Диаметр проволоки, мм	Значение пластичности			
		центр, $d = 0$	$d = 0,3\phi$	$d = 0,6\phi$	$d = 0,9\phi$
1	0,35	0,9589	0,968	0,965	0,962
			0,965	0,972	0,962
			0,959	0,965	0,979
Среднее значение		0,9589	0,9638	0,9672	0,9679

Качественное сравнение расчетного распределения осевой пластической деформации (рис. 4, 2) с экспериментальным распределением пластичности (рис. 4, 1) показывает, что распределение расчетной осевой пластической деформации обратно пропорционально распределению экспериментальной пластичности. Полученное сравнение указывает на адекватность численного расчета, так как пластичность и степень деформации, сопровождаемая упрочнением, находятся в обратной зависимости. На этом основании можно предполагать о наличии достоверности в полученных значениях распределения расчетных эквивалентных пластических деформаций на рис. 2.

Компоненты тензора деформации ϵ_{rr} , $\epsilon_{\theta\theta}$, ϵ_{zz} максимальны в центре очага деформации прово-

локи при волочении. Тогда, согласно критерию пластичности сплошных сред, предложенного Мизесом, неравномерность деформации проволоки по сечению определяется главным образом величиной сдвиговых деформаций ϵ_{rz} . Параметры, влияющие на величину деформации сдвига ϵ_{rz} , определяют степень неравномерности деформации проволоки по сечению. Увеличение единичных обжатий и уменьшение угла конической части волоки снижают неравномерность деформаций [5].

Тогда уменьшение единичного обжатия проволоки за счет введения в маршрут волочения разбивкой обжатия для снижения степени деформации и уменьшения максимальной температуры поверхности проволоки повлияет на распределение деформаций в оптимизированном маршруте волочения.

Распределение пластической деформации в поперечном сечении проволоки получено численным расчетом с использованием метода конечных элементов. Результаты расчета для каждой волоки по маршруту действующего процесса волочения приведены на рис. 5.

Из рисунка видно, что соотношение суммарной пластической деформации в поверхностных и внутренних слоях поперечного сечения сохраняются в маршруте волочения несмотря на увеличение абсолютных значений пластической деформации слоев проволоки по мере прохождения по маршруту волочения.

Распределение деформаций сдвига в продольном сечении проволоки в очаге деформации 25-й волоки показано на рис. 6.

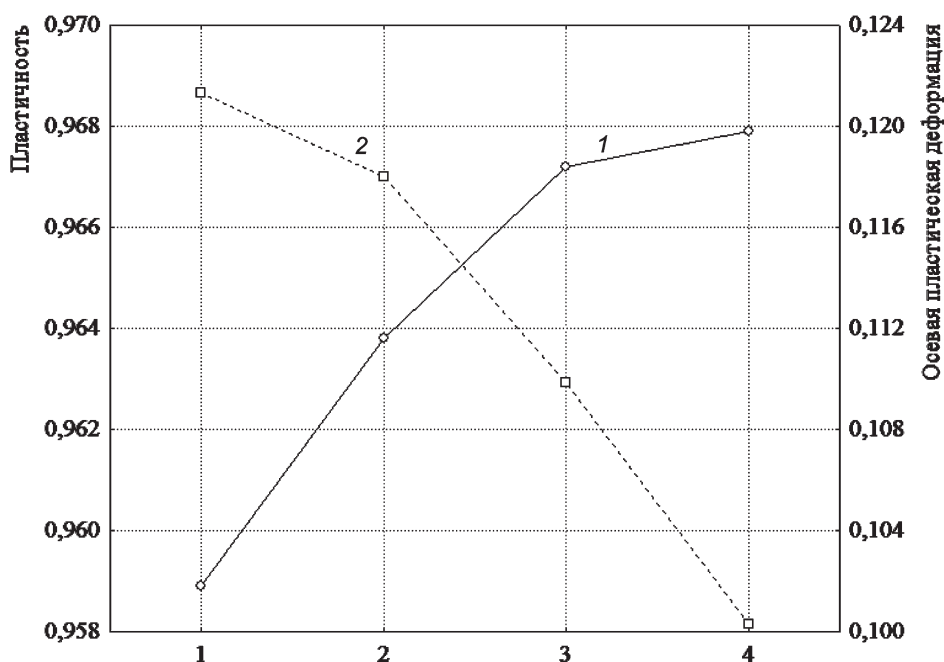


Рис. 4. Сравнение значений экспериментального определения пластичности (1) с распределением осевой пластической деформации (2) в поперечном сечении проволоки диаметром 0,35 мм

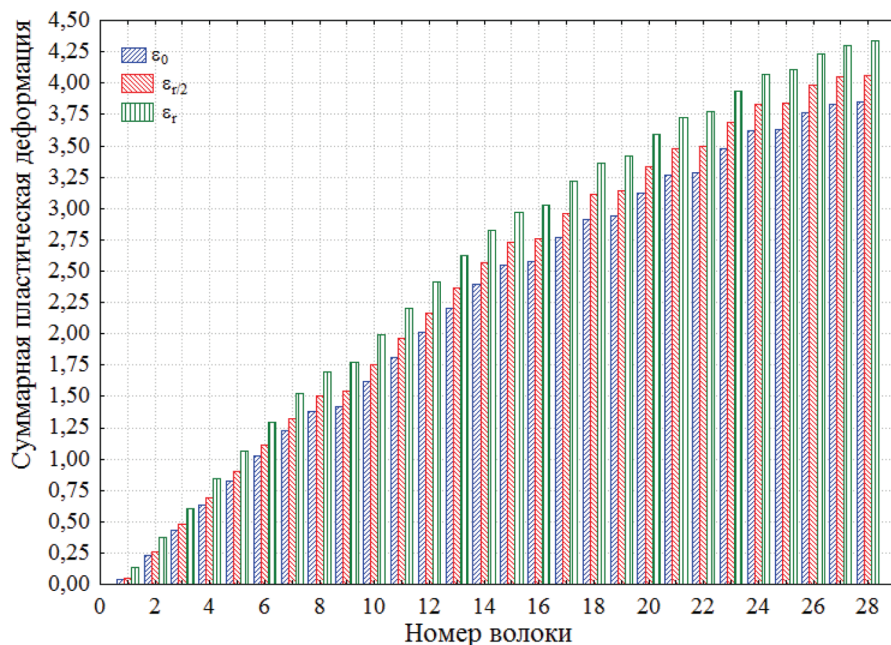


Рис. 5. Распределение пластической деформации в поперечном сечении проволоки в базовом маршруте волочения

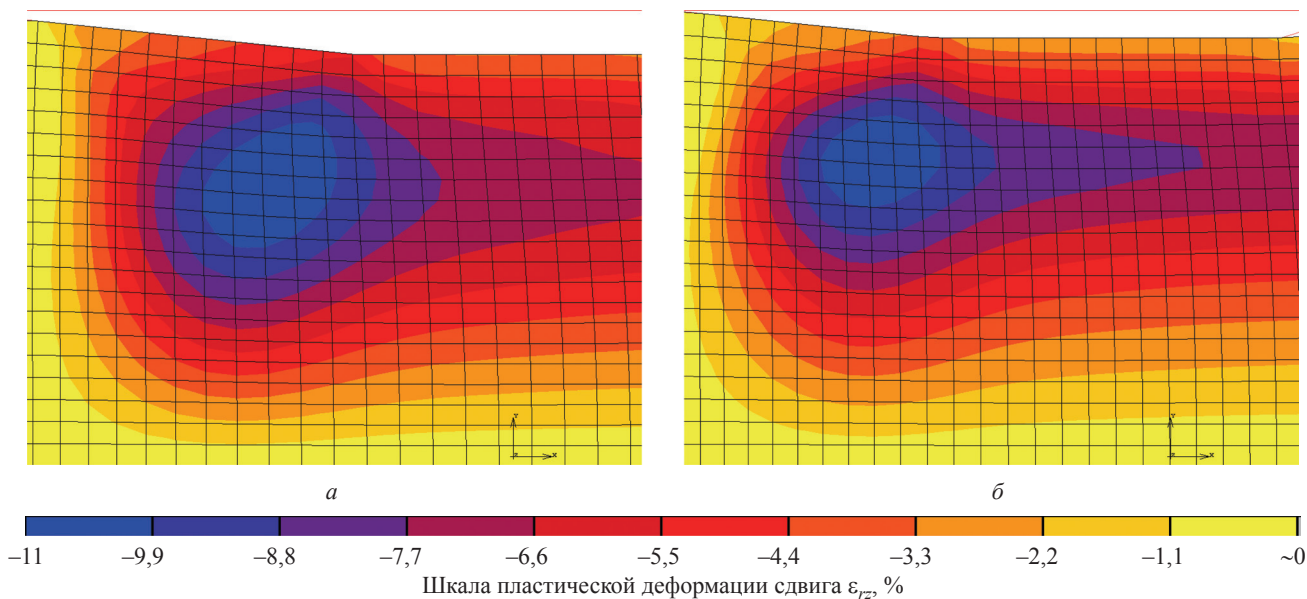


Рис. 6. Поле деформаций сдвига ϵ_{rz} в 25-й волоке: а – с единичным обжатием $H = 12,7\%$ и углом конической части проволоки $\alpha = 12^\circ$; б – с единичным обжатием $H = 9,36\%$ и углом конической части проволоки $\alpha = 12^\circ$

Анализируя распределение полей деформации сдвига (рис. 6) в виде цветокодированных изображений, можно отметить, что с уменьшением единичного обжатия при волочении поле максимальных значений деформации сдвига смещается к поверхности проволоки, что приводит к перераспределению суммарной пластической деформации между внутренними и поверхностными слоями проволоки.

На рис. 7 показано изменение коэффициента деформационной неравномерности K_ϵ для базового и оптимизированного маршрута волочения.

Анализируя совместно выражение (1) и рис. 7, получаем, что при $K_\epsilon = 1$ пластическая деформа-

ция между слоями от центра до поверхности в поперечном сечении тонкой проволоки распределена равномерно. Тогда, чем ближе значение коэффициента K_ϵ к 1, тем равномернее распределена суммарная пластическая деформация в проволоке.

Сравнивая базовый маршрут волочения с маршрутом с пониженным единичным обжатием тонкой проволоки по деформационному критерию, можно увидеть улучшение пластических характеристик тонкой ультравысокопрочной проволоки по таким показателям, как полное удлинение (на 6%), число реверсивных скручиваний (в 9,14 раз) и число скручиваний двух проволок на базе 250 мм

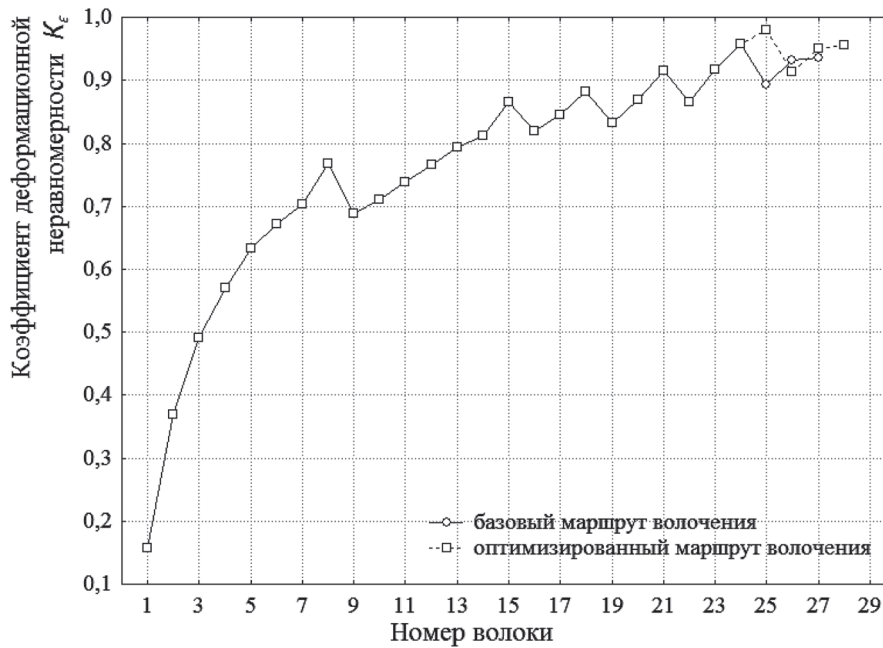


Рис. 7. Изменение коэффициента деформационной неравномерности K_ϵ в базовом и оптимизированном маршруте волочения

под нагрузкой 20% от разрывного усилия (в 1,85 раза) [6].

Предложен деформационный критерий оценки для оптимизации маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки, позволяющий увели-

чить пластические свойства проволоки при сохранении ее прочности в допустимых пределах с целью повышения технологичности свивки металлокорда из этой проволоки.

Литература

1. Б о б а р и к и н Ю. Л. Математическое описание формирования пластических свойств проволоки из стали 90 при высокоскоростном волочении / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков // Литье и металлургия. 2011. № 3. С. 61–65.
2. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. ГОСТ 2999-75. М.: Изд-во стандартов, 1987.
3. Ф е д о с о в С. А., П е ш е к Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием. Современные зарубежные методики. М.: Физический факультет МГУ, 2004.
4. М и л ь м а н Ю. В., Ч у г у н о в а С. И., Г о н ч а р о в а И. В. К вопросу определения пластичности материалов методом индентирования.
5. Б о б а р и к и н Ю. Л., В е р е щ а г и н М. Н. Оптимизация тонкого волочения высокоуглеродистой стальной проволоки. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011.
6. Б о б а р и к и н Ю. Л. Методика оценки качества проволоки / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, С. И. Прач // Сб. материалов ЗНТК молодых работников ОАО «БМЗ» «Металл-2012». Жлобин. 2011. С. 52–55.