

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ

THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DESTRUCTION CRITERION WIRE DRAWING OF HIGHLY CARBONACEOUS ROLLED WIRE

Харитонов В.А.¹, Столяров А.Ю.²

¹ ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,

² ЗАО «Уралкорд»,

Россия, aleksey_stolyarov@uralcord.ru

The selection of acceptable destruction criterion for determining maximum deformation degree of highly carbonaceous rolled wire and the determination of its allowed value is realized on the basis of analysis of the existing destruction criteria which are used in the domestic theory and practice of working metals by pressure. The diagram of the procedure of destruction criterion value determination for selected material of rolled wire is represented. On the basis of given procedure of determination destruction criterion limiting value is determined the possible maximum degree of the summary deformation of highly carbonaceous rolled wire by the diameter of 5,50 mm with drawing wire for the cord with wire spiral insert. The application effectiveness of the developed criterion with the technological regimes calculation of competitive production product is proven.

Повышение качества высокоуглеродистой стальной катанки и снижение её минимального диаметра с 6,50 мм до 5,50 мм позволяет при прочих равных условиях уменьшить время волочения и затраты на передел. Ещё более значительное сокращение цикла обработки и затрат на передел обеспечивает исключение операции промежуточного патентирования, которое обычно производится при волочении тонкой проволоки из катанки диаметром 6,50 мм. Однако, при волочении проволоки под готовую непосредственно из катанки диаметром 5,50 мм возрастает степень суммарной деформации и вероятность появления в проволоке трещин, надрывов и т.п., что приводит к нарушению сплошности металла и является причиной возникновения разрушения. Одним из способов решения данной проблемы является разработка методики определения максимально допустимой вытяжки высокоуглеродистой катанки в процессе волочения на основе выбора и расчёта критерия разрушения, как показателя предельной деформируемости металла.

Обзор критериев разрушения, использующихся в отечественных теории и практике обработки металлов давлением, в том числе и для процесса волочения, представлен в работах [1-4]. В настоящее время широкое применение получил критерий В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова («трещиноватость») [2, 5, 6], характеризующий поражённость микродефектами элементарного объёма, окружающего данную частицу металла. На основе теории феноменологического разрушения также были предложены критерии разрушения В.А. Огородниковым [7], Г.Д. Делем [8]. Обзор критериев разрушения (образования осевых трещин) в процессе волочения, используемых за рубежом, представлен N. Roger [3], который отметил, что наиболее распространёнными критериями являются такие, как фактор формы очага деформации Δ , критерий Avitzur, критерии Coffin and Rogers, Nakagiri, M.G. Cocroft, - D.J. Latham. Эти критерии нашли

широкое применение во многих современных программных комплексах, основанных на конечно-элементных моделях, таких как DEFORM [9], DRAWING 2D [10] и др.

Общим для всех предложенных критериев является то, что трещинообразование и последующее разрушение при металлообработке происходит под действием растягивающих напряжений. Эта концепция является основополагающей при расчёте предельной деформируемости металла. Особенно это актуально для волочения проволоки в монолитных волокнах, т.к. по сравнению с другими видами обработки металлов давлением оно характеризуется действием постоянно приложенного растягивающего напряжения.

Цель настоящей работы заключается в выборе приемлемого критерия разрушения для определения предельной степени деформации высокоуглеродистой катанки и определение его допустимого значения.

Процесс волочения катанки под тонкую высокопрочную проволоку является многократным, поэтому критерий разрушения (предельной деформируемости катанки) должен учитывать накопленную степень деформации. По этой причине ряд критериев, таких как фактор формы очага деформации Δ , критерий Avitzur, критерии Coffin and Rogers, Nakagiri для анализа возможности суммарной вытяжки катанки применить не возможно.

В работах [1,4,11] отмечается, что при проектировании технологических процессов для оценки предельной степени деформации широкое применение получил критерий M.G. Cocroft, D.J. Latham (далее по тексту «С») по следующим причинам:

- расчётное значение критерия разрушения «С» имеет наибольшую сходимость с тестовыми результатами испытаний;

- критерий прост и удобен для расчёта, а также реализован во многих программных комплексах, в том числе и в DEFORM.

Недостатком критерия «С» является то, что он, в отличие от других критериев разрушения [2, 5-8], не учитывает положительное влияние сжимающих напряжений в схеме напряжённого состояния и влияние знакопеременной деформации. Однако, для анализа предельной деформируемости металла при волочении, где по мнению А.А. Богатова [2], с достаточной для инженерных расчётов точностью можно считать, что центральная часть протягиваемой проволоки находится под действием растягивающих напряжений, критерий «С» может быть применим для расчётов и его использование предпочтительнее в данном случае по сравнению с другими критериями.

Критерий «С» основан на оценке полной работы деформации на единицу объёма в точке разрушения.

$$C = \int_{\bar{\varepsilon}}^{\bar{\varepsilon}^*} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad (1)$$

$\bar{\varepsilon}$ - накопленная эквивалентная деформация;

σ^* - максимальное главное напряжение;

$\bar{\sigma}$ - эквивалентное напряжение по Мизесу.

Графически это выражается, как площадь под кривой зависимости отношения максимального главного (растягивающего) напряжения к эквивалентному напряжению по Мизесу от степени накопленной деформации (рис. 1).

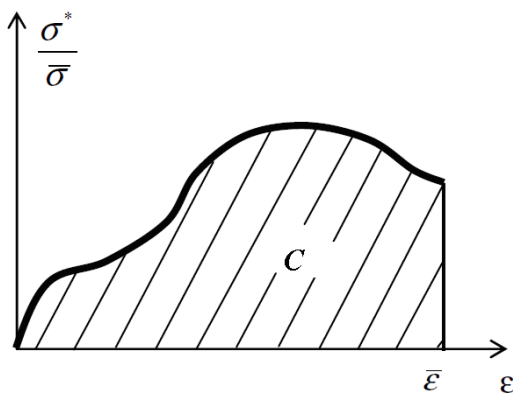


Рис. 1. Нормализованный критерий разрушения M.G. Cocroft, D.J. Latham «С»

Методические рекомендации по экспериментальному определению критерия разрушения «С» приведены в работах [4,12,13]. Схематично методику определения значения критерия разрушения для выбранного материала можно представить следующим образом (рис. 2).

В работах [1,14] приводится сравнительный анализ данных «истинной пластичности» материала (предельной степени деформации сдвига) от коэффициента напряжённого состояния, полученных при различных видах испытаний, на основании которых сделан вывод, что наиболее подходящим способом экспериментального определения

критерия разрушения является испытание на растяжение.

После проведения испытаний на «реальных» образцах, аналогичные испытания проводятся методом компьютерного моделирования (CAD моделях) в программной среде, основанной на конечно-элементных моделях. Результаты моделирования данного процесса методом конечных элементов сопоставляются с результатами испытаний, полученными при тестах на растяжение. В местах локализации растягивающих напряжений, т.е. на оси образца, рассчитывается значение критерия разрушения «С», предельное значение которого соответствует изменению угла наклона кривой «напряжения - деформации» при проведении «реального» теста на растяжение. Для компьютерного моделирования испытаний образцов на растяжение может быть использован программный комплекс DEFORM, в котором имеется возможность определения критерия разрушения по M.G. Cocroft, D.J. Latham.

Для определения предельной степени деформируемости была взята высокоуглеродистая катанка диаметром 5,50 мм с содержанием углерода 0,79 % (сталь 80), серийно используемая для изготовления металлокорда и бортовой проволоки [15].

Испытание образцов на растяжение осуществлялось по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение».

Образцы для испытаний на растяжение с целью определения предельной степени деформации были изготовлены с выточкой (шейкой) достаточно пологой для того, чтобы до наступления разрушения всё сечение образца в месте шейки перешло из упругого в пластическое состояние. Жёсткость напряжённого состояния в шейке определяется её формой – отношением диаметра в минимальном сечении шейки «d», к радиусу кривизны профиля шейки «R». Определённая форма шейки образца [16] - обеспечивает монотонность деформации и равномерность степени деформации сдвига во всех точках поперечного сечения шейки. Разрушение наступает на оси образца в зоне шейки, где имеется всестороннее растяжение. Предельная степень деформации соответствует моменту изменения угла наклона кривой «напряжения - деформации» при проведении теста на растяжение.

Для получения достоверных результатов испытаний отношение d/R должно быть в пределах 0÷4 [2, 5-7]. Поэтому было приготовлено три серии по пять образцов с соотношением d/R равным соответственно: 1,00; 1,25 и 1,50.

«Реальные» испытания образцов катанки производились на испытательной машине H50 - КТ («Tinius Olsen Ltd», ENGLAND) с программным обеспечением «QMat Professional», позволяющим в реальном времени фиксировать значения кривой «деформация - напряжение». Скорость движения захватов 20 мм/мин.



Рис.2 Схема методики определения предельного значения критерия «С».

Температура окружающей среды 25°C . Компьютерное моделирование растяжения образцов осуществлялось в программной среде DEFIORM-2D.

На первой стадии эксперимента была получена кривая в координатах «деформация - напряжение» для гладких образцов, которая была

переведена в координаты программного комплекса DEFORM «flow stress – strain» в свойства вновь созданного материала «Steel 80». Поскольку большинство металлов при холодной пластической деформации не проявляют вязких свойств, скорость деформации не учитывалась.

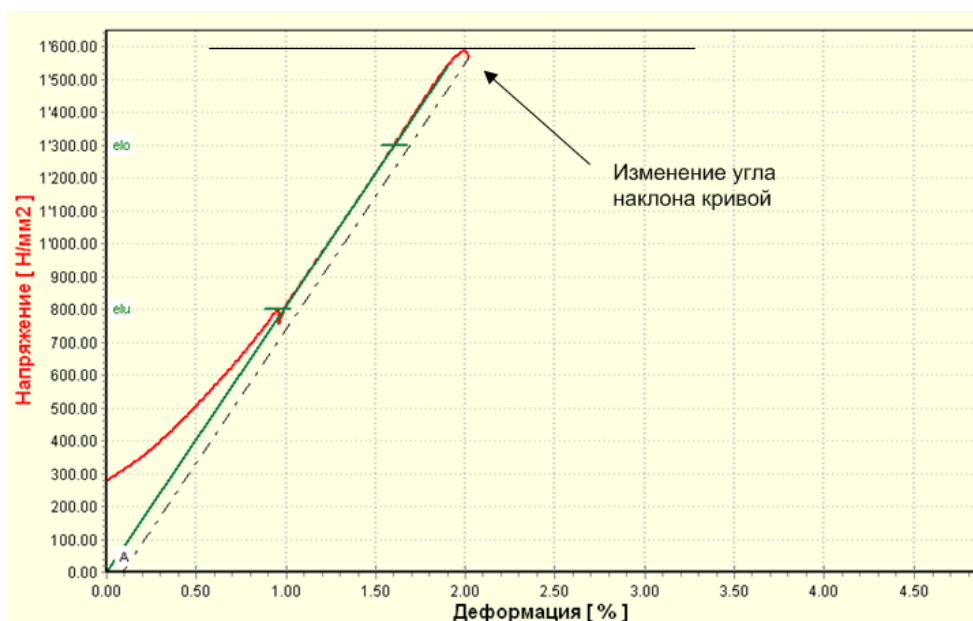


Рис.3 Кривая «деформация – напряжение» для образцов с выточкой и предельное значение общего удлинения для образца с выточкой $d/R = 1,25$

Затем были проведены испытания образцов с выточкой. Для каждой серии образцов были получены значения удлинения в момент изменения угла наклона кривой «деформация - напряжение». Для примера показана кривая «деформация - напряжение» для образца с выточкой $d/R = 1,25$ (рис.3). Методика испытаний предполагает предварительную нагрузку образца с целью исключения проскальзывания. По этой причине запись значений напряжения осуществляется с отметки 300 Н/мм^2 , а не от нулевого значения. В последствие моделирование процесса растяжения образца в программном комплексе DEFORM-2D осуществлялось до указанного значения общего удлинения образца.

При растяжении образцов с выточкой эффективная деформация локализуется в шейке, а

растягивающие напряжения локализуются на оси образца, создавая благоприятные условия для разрушения. В момент, когда угол наклона кривой «деформация - напряжение» меняет своё значение, при заданном значении относительного удлинения (в приведённом примере 2,20 %) фиксируется значение критерия «С», рис.4-6. В нашем случае это практически соответствует разрушению образца. Таким образом, при компьютерном моделировании процесса растяжения критическое значение предельной степени деформации можно установить, производя растяжение до таких значений удлинения, при которых произошло разрушение «реальных» образцов.

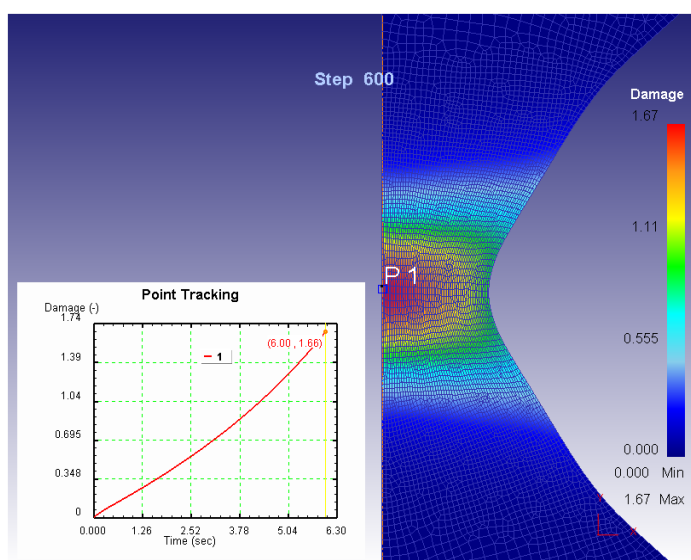


Рис.4 Критерий разрушения «С» (Damage-1,66) на оси образца: $d/R = 1,50$.

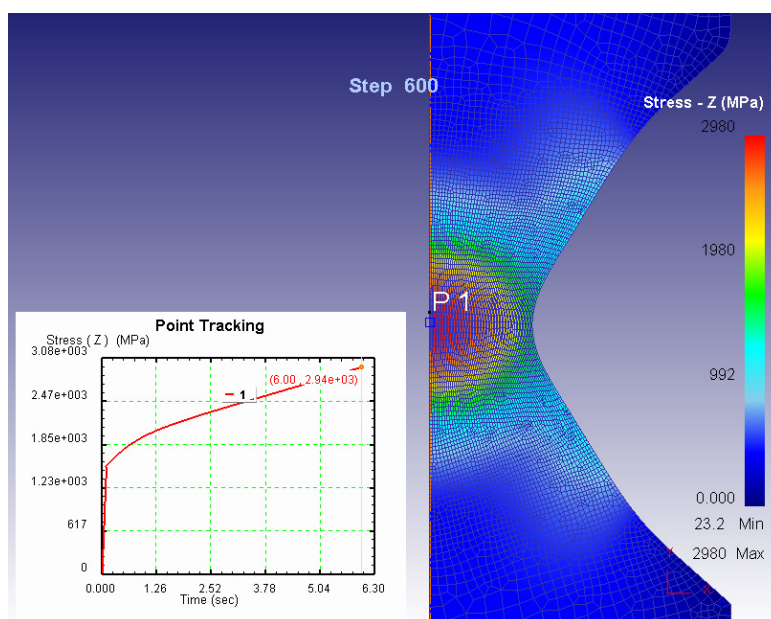


Рис.5 Осевое растягивающее напряжение (Stress Z - 2940 МПа): $d/R = 1,5$.

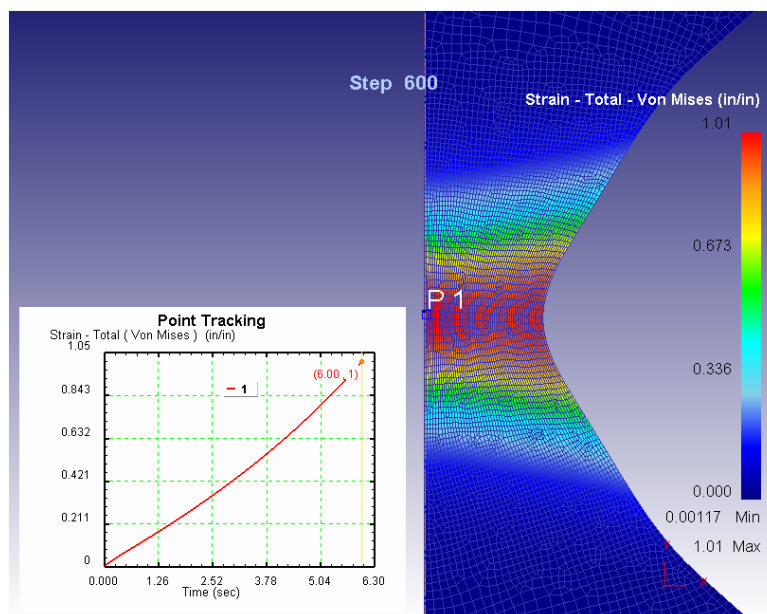


Рис.6 Эффективная деформация (Strain Total Von-Mises – 1,01) на оси: d/R – 1,5.

Результаты «реальных» испытаний и результатов компьютерного моделирования растяже-

ния образцов с выточкой, а также расчётное значение критерия «С» приведены в таблице

Таблица

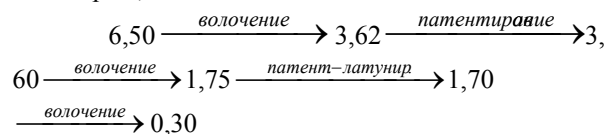
Результаты расчёта критерия «С» для стали марки 80

Номер серии образцов	Отношение d/R	Показатели пластичности в реальных тестах		Результаты моделирования в программной среде DEFORM 2-D		
		Отн.удл, %	Степень деформации сдвига, λ	Stress Z, МПа	Strain total Von Mises, mm/mm	С, критерий M.G.Cocroft, D.J. Latham.
1	0,95	1,80	0,15	2890	1,04	1,63
	1,02	1,70	0,19	2830	0,98	1,52
	0,95	1,70	0,20	2830	0,98	1,52
средн.	0,97	1,73	0,18	2850	1,00	1,56
2	1,19	2,00	0,08	2890	0,99	1,58
	1,25	1,90	0,17	2840	0,94	1,49
	1,19	2,00	0,08	2890	0,99	1,58
средн.	1,21	1,97	0,11	2873	0,97	1,55
3	1,54	2,20	0,07	2940	1,01	1,62
	1,56	2,15	0,13	2890	0,96	1,58
	1,43	2,20	0,07	2940	1,01	1,62
средн.	1,51	2,18	0,09	2923	0,99	1,59
Среднее значение по всем сериям испытаний						1,58

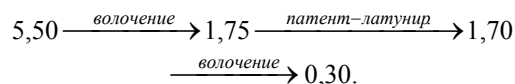
На основании результатов испытаний образцов высокоуглеродистой катанки с определённой формой выточки, обеспечивающей монотонность деформации и результатов моделирования характера напряжённого состояния в шейке, установлено предельное значение критерия разрушения «С» по M.G. Cocroft, D.J. Latham для выбранной марки стали.

На основании приведённой методики определения предельного значения критерия разрушения «С» методом конечно-элементного моделирования на ЗАО «Уралкорд» была определена возможная предельная степень суммарной деформации высокоуглеродистой катанки диаметром 5,50 мм при волочении проволоки под металлокорд. В

результате действующая технологическая схема изготовления тонкой проволоки диаметром 0,30 мм из катанки диаметром 6,50 мм с использованием операции промежуточного патентирования на диаметре 3,60 мм:



была заменена на схему без использования операции промежуточного патентирования:



Изготовление металлокорда по новой технологической схеме позволило снизить затраты на его изготовление, сохраняя на высоком уровне качественные характеристики готовой продукции и существенно повысить её конкурентоспособность.

Библиографический список

1. Cockett M.J. Ductility and workability of metals / Cockett M.J., Latham D.J. // Journal of the Institute of Metals.- 1968.- Vol.96.- p.33-39.
2. Богатов А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов.- М.: Металлургия, 1984.-146 с.
3. Roger N. Wright. Center bursts – a review of criteria / Roger N. Wright // Wire Journal.-2009. - October. - p. 80-84.
4. Н. Kim, М. Yamanaka, Т. Altan Prediction and elimination of ductile in cold forgings using FEM simulation. STFC ref. 103 // http://artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/ref_103.pdf
5. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение / В.Л. Колмогоров. - М.: Металлургия, 1970.-231 с.
6. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров [и др.]. - М.: Металлургия, 1977.-337 с.
7. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А. Огородников.- К.: УМК ВО, 1989.- 152 с.
8. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978.- 175 с.
9. Internet page: <http://www.deform.com>
10. А. Milenin, В.Р. FEM simulation of wire fracture phenomena during multi-pass drawing / А. Milenin, В.Р. Gautham, Sharad Goyal // Wire Journal.-2008. -October.- p. 93-99.
11. David Hant. Finite Element Assisted Prediction of Ductile Fracture in Sheet Bulging of Magnesium Alloys / David Hant // Submitted in Fulfilment of M. Eng Thesis. - 2008. - September.
12. J. Hoffman. Prediction of ductile fracture in forward extrusion with spherical dies / J. Hoffman, Victor H. Vazquez, Camille Santiago-Vega, Taylan Altan // Transactions of NAMRI/SME.- 2000. – Vol. XXVIII.
13. В.Уле. Cockcroft-Latham fracture criterion and bulk workability of Copper base alloy / В.Уле, V. Leskovsek, K. Kuzman and all // Kовine,zlitine,tehnologije.- 1994. - letnik 28.
14. Шелест А.Е. Анализ изменения показателя напряжённого состояния и предельной степени деформации сдвига в различных процессах испытания металлов / А.Е. Шелест, Е.Б. Батова // Пластическая деформация конструкционных материалов. - М.: Наука.-1988.- с.12-25.
15. Столяров А.Ю. Анализ влияния качества высокоуглеродистой стальной катанки на режимы изготовления металлокорда и бортовой проволоки на ЗАО «Уралкорд» / А.Ю. Столяров, Н.В. Токарева // Металловедение и термическая обработка металлов: Междунар. сб. науч. тр./ Под ред. А.Н. Емелюшина и Е.В. Петровича. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ».-2009.-с.25-31.
16. Давиденков Н.А. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Давиденков Н.А., Спиридонова Н.И. // Заводская лаборатория. -1945. - № 6. - С. 583-593.