

© Ю.Н. Логинов, 2012 г.  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург  
*unl@mtf.ustu.ru*

© К.В. Еремеева, 2012 г.  
ОАО «Уралгипромет», г. Екатеринбург  
*eremeevakv@uralgipromet.ru*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОРЫ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ**

В металлообработке постоянно повышаются требования к качеству выпускаемой продукции, поэтому все больший интерес проявляется к исследованиям процессов возникновения и развития дефектов на поверхности [1–3] и внутри изделия [4–6]. Одним из видов дефектности в металле является наличие дефектов сплошности, таких как поры, разрывы.

Например, в практике волочения известно появление одиночно расположенных внутренних разрывов прутка или проволоки при неправильном назначении параметров процесса. В зарубежной литературе такие дефекты получили название «central bursts» – центральные разрывы [4, 7]. При продолжении процесса волочения эти разрывы преобразуются в поры, имеющей специфическую конфигурацию, – макропоры. При дальнейшей деформации заготовок с такими дефектами возможно различное развитие событий: от залечивания дефекта до его раскрытия и обрыва заготовки по месту его расположения.

Моделирование поведения пор, расположенных в центре очага деформации, при волочении выполняли с применением программного комплекса «РАПИД-2D», разработанного сотрудниками Уральского государственного технического университета (УГТУ–УПИ), ныне УрФУ [8].

Решение задачи рассматривали в различных вариантах:

1. Опорное решение задачи для случая волочения заготовки, не содержащей пору, на примере деформации катаной меди М00 диаметром 8 мм с коэффициентом вытяжки  $\lambda = 1,5$  (относительное обжатие 33 %) при коэффициенте трения по Зибелю 0,1 и скорости волочения 1,98 м/с. Угол наклона образующей волокна назначили равным  $10^\circ$ , что характерно для технологии предприятий, использующих алмазные поликристаллические волокна, а не твердосплавные, даже при волочении заготовки таких крупных размеров.

Результат решения получен в виде линий равного уровня показателя напряженного состояния  $\sigma/T$ , где  $\sigma$  – среднее (гидростатическое) напряжение;  $T$  – интенсивность касательных напряжений. Распределение показателя  $\sigma/T$  показало, что на периферии очага деформации преобладают сжимающие напряжения ( $\sigma/T \approx -0,5$ ), что благоприятно сказывается на пластичности металла. Однако внутри очага деформации существует зона в осевой части заготовки с пониженным значением сжимающих напряжений ( $\sigma/T \approx 0 \dots -0,25$ ), что говорит об ухудшении напряженного состояния в этом месте и повышении вероятности разрушения.

2. Решение задачи волочения заготовки, в центре которой расположена круглая пора начальным диаметром  $d_{п0} = 1$  мм, при тех же граничных условиях и  $\lambda = 1,5$ .

По результатам полученного решения пора в сечении приобрела форму овала, коэффициент вытяжки поры составил  $\lambda_{п} = 1,8$ . Таким образом, удлинение поры превысило на 20 % удлинение окружающего металла. При этом поперечный размер поры уменьшился в 1,7 раза при уменьшении диаметра заготовки  $D$  в 1,2 раза. Распределение показателя  $\sigma/T$  по очагу деформации показало, что в периферийных слоях заготовки сохранились сжимающие напряжения. В области, окружающей пору, наблюдались зоны действия растягивающих напряжений, максимальное значение  $\sigma/T$  составило  $+0,14$ , что говорит о повышении вероятности разрушения металла вблизи места расположения такого дефекта.

3. Решение задачи волочения заготовки с порой при тех же граничных условиях и коэффициенте вытяжки  $\lambda = 1,2$ .

Решение показало, что удлинение поры составило 1,5. Это больше коэффициента вытяжки заготовки, равного 1,2. Ширина поры уменьшилась в 1,25 раза. Показатель  $\sigma/T$  вблизи поры ухудшился и составил  $+0,75$ . Таким образом, возросла вероятность разрушения металла.

4. Решение задачи волочения заготовки с порой при тех же граничных условиях, коэффициенте вытяжки  $\lambda = 1,2$  и предварительной нагартовке металла до  $\Lambda_0 = 5$  (что эквивалентно примерно десяти предшествующим проходам волочения).

Удлинение поры не изменилось, но ширина поры уменьшилась значительно, чем в предыдущем случае, что говорит о большей степени сжатия. Показатель  $\sigma/T$  вблизи поры не ухудшился.

По результатам моделирования выполнили описание изменения формы и объема поры в категориях механики деформируемой среды. Начальные размеры поры в направлении длины заготовки, радиуса и в тангенциальном направлении обозначили как  $l_{п0}$ ,  $b_{п0}$ ,  $c_{п0}$ , конечные размеры как  $l_{п1}$ ,  $b_{п1}$ ,  $c_{п1}$ . Деформации в этих направлениях можно оценить как  $\varepsilon_{пz} = \ln(l_{п1}/l_{п0})$ ,  $\varepsilon_{пr} = \ln(b_{п1}/b_{п0})$ ,  $\varepsilon_{п\phi} = \ln(c_{п1}/c_{п0})$ . Степень изменения объема поры определена как сумма величин:  $\varepsilon_{п} = \varepsilon_{пz} + \varepsilon_{пr} + \varepsilon_{п\phi}$ . Для

осесимметричной деформации применили правило равенства двух компонент тензора деформаций:  $\varepsilon_{nr} = \varepsilon_{np}$ .

Результаты расчета формоизменения приведены в таблице, откуда видно, что при повышенном коэффициенте вытяжки происходит уменьшение объема центрально расположенной полости.

Таблица 1

Итоговые показатели расчета формоизменения  
и напряженно-деформированного состояния заготовки с порой

$\Lambda_0$	$\lambda$	$\lambda_n$	$\varepsilon_{nz}$	$\lambda_n / \lambda$	$\varepsilon_{nr}$	$D_1/D_0$	$d_{n1}/d_{n0}$	$\varepsilon$	$(\sigma/\tau)_{\max}$
0	1,5	-	-	-	-	-	-	-	0
0	1,5	1,8	0,59	1,2	-0,53	0,83	0,59	-0,47	+0,14
0	1,2	1,5	0,41	1,3	-0,14	0,91	0,87	0,13	+0,80
5	1,2	1,5	0,41	1,3	-0,37	0,91	0,69	-0,33	+0,60

### Выводы

1. Внутренние разрывы металла или поры, расположенные в центре заготовки, при волочении могут увеличиваться в размерах из-за повышенного уровня растягивающих напряжений.

2. При проектировании технологии волочения не следует назначать малые величины обжатий, поскольку это создает опасность увеличения в размерах внутренних разрывов, пор, расположенных в центре заготовки.

3. При наличии в центре заготовки поры ее линейные размеры при волочении изменяются быстрее, чем линейные размеры заготовки.

### Список использованных источников

1. Phelan P., Brandon J., Hillery M. Numerical modelling of defect formation on copper wire surface during the wire drawing process // Journal of Mechanical Engineering Science. 2001. V. 215. № 2. P. 237–246.

2. Логинов Ю.Н. Модель деформации поверхностного слоя заготовки, пораженного дефектами // КШП. ОМД. 2001. № 4. С. 36–40.

3. Логинов Ю.Н., Инатович Ю.В. Механизм образования дефектов на полосе при прокатке от налипания на валке // Производство проката. 2008. № 8. С. 5–8.

4. Mcallen P., Phelan P. Ductile Fracture by Central Bursts in Drawn 2011 Aluminium Wire // International Journal of Fracture. 2005. Vol. 135. № 1–4. P. 19–33.

5. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Моделирование поведения поры при плоской прокатке // Теория и практика производства листового проката : сб. науч. тр. Липецк: ЛГТУ, 2008. Ч. 2. С. 95–100.

6. Брусницын С.В., Логинов Ю.Н., Мысик Р.К. и др. Дефекты слитков черных и цветных металлов, предназначенных для пластической деформации. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2007. 167 с.

7. Murr L.E., Flores R.D. Defects and failure in ultra-fine copper magnet wire // Scripta Materialia. 1998. Vol. 39. № 4–5. P. 527–532.

8. Полищук Е.Г., Жиров Д.С., Вайсбурд Р.А. Система расчета пластического деформирования «РАПИД» // Кузнечно-штамповочное производство. 1997. № 8. С. 16–18.