

## **Использование критерия предельной пластичности для контроля качества готовой проволоки после тонкого волочения.**

**Авторы:** Прач Светлана Игоревна, аспирант, УО ГГТУ им. П.О. Сухого;

**Руководитель:** Бобарикин Юрий Леонидович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «МиЛП», ГГТУ имени П.О. Сухого.

Вопросы контроля технологии сталепроволочного производства и контроля качества продукции в проволоки и металлокорда неразделимы. Известно, что оптимальным способом контроля качества готовой продукции служит своевременный и рациональный контроль технологических режимов ее получения. В данной работе теоретически обосновывается возможность контроля качества готовой проволоки путем оценки резерва пластических свойств проволоки, формируемых в процессе тонкого волочения.

Исследования основаны на предположении: чем выше пластические свойства стали проволоки при сохранении ее прочностных характеристик, тем выше технологичность обработки проволоки. Пластические свойства оцениваются с помощью критерия предельной пластичности.

Анализ потери пластических свойств стали и возникновения микротрещин выполняется с помощью критерия возникновения трещин или критерия предельной пластичности:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta\Lambda_i}{\Lambda_i} \right)^{a_i} = 1, \quad (1)$$

где  $\Psi$  - степень использования запаса пластичности;  $n$  – число этапов деформирования к моменту разрушения;  $a_i$  – эмпирический коэффициент, зависящий от схемы напряженного состояния;  $\Lambda$ - степень деформации сдвига.

Для установления условий разрушения металла при высокоскоростном волочении проволоки в соответствии с условием (1) необходимо произвести расчеты деформационно-кинематических и энергосиловых параметров процесса волочения проволоки по действующим маршрутам волочения.

Расчет проводится по следующей ниже разработанной методике.

Вначале рассчитывается базовый процесс волочения заданного диаметра и свойства проволоки, который обеспечивает относительно стабильное удовлетворительное качество проволоки.

Исходные данные к расчету: ряд последовательных диаметров волок для рассчитываемого маршрута волочения  $d_i$ , мм; полууглы конусов рабочих зон для каждой волоки  $\alpha_i$ , рад; коэффициенты длины калибрующей зоны волоки  $m_i$ , определяющие длину этой зоны  $d_i m_i$ ; скорость проволоки для последней волоки  $V_n$ , м/с; величина противонапряжения проволоки для первой волоки  $\sigma_{v0}$ , МПа; количество витков проволоки на тяговой шайбе для переходов волочения,  $z_i$ ; коэффициент контактного трения в волоке,  $f$ ; коэффициент контактного трения между витками проволоки и поверхностями тяговых шайб  $f_{ш}$ ; значения максимальных температур в очаге деформации для каждой волоки, полученные с помощью численного моделирования или аналитического расчета процесса волочения  $T_i$ , °С; зависимость для определения сопротивления пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$ , МПа, где  $\varepsilon \Sigma_i$  - итоговая логарифмическая деформация проволоки для  $i$ - го перехода волочения; зависимость может быть получена аппроксимацией экспериментальной кривой растяжения проволочной заготовки; сопротивление пластической деформации проволочной заготовки  $\sigma S_0$ , МПа; скорость деформирования  $\xi_0$ , использованная при получении зависимости  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$ , 1/с; функция для коэффициента влияния скорости деформации на сопротивление пластической деформации проволоки  $Z_i = f(\xi_i)$ , где  $\xi_i$  - скорость деформации проволоки для каждого  $i$  - го перехода волочения; функция может приниматься из справочных данных или из экспериментальных зависимостей; зависимости для диаграмм пластичности  $A_{pi} = f(k_i)$ , соответствующие разной степени упрочнения обрабатываемой проволоки, где  $A_{pi}$  - интенсивность сдвиговой деформации разрушения,  $k_i$  - коэффициент напряженного состояния очага деформации для каждого перехода волочения; зависимости могут быть получены аппроксимацией экспериментальных кривых диаграмм пластичности; базовое значение коэффициента запаса пластичности  $\Psi_{баз} = 0,8$ , принимаемое для известного действующего процесса волочения, который обеспечивает относительно стабильное удовлетворительное качество проволоки, который называется базовым процессом. Если после изменения режимов этого процесса, например, увеличения скорости волочения, изменения коэффициента контактного трения, маршрута волочения и так далее,  $\Psi$  уменьшается или остается равным относительно  $\Psi_{баз}$ , то такие изменения не приведут к потере качества проволоки, а если  $\Psi$  увеличится относительно  $\Psi_{баз}$ , то качество ухудшится вследствие исчерпания при волочении запаса пластичности и трещинообразования; паспортные кинематические вытяжки для тяговых шкивов  $\mu_i$ .

Расчет базового процесса с целью поиска значение степенного коэффициента  $a_0$  и определения относительных скольжений для тяговых шкивов ведется путем определения следующих параметров:

1. Вытяжка:  $\mu_i = \frac{(d_{i-1})^2}{(d_i)^2}$ ; 2. Скорость волочения:  $V_{i-1} = \frac{V_i}{\mu_i}$ , мм/с ; 3. Длина очагов деформации:  $l_i = \frac{(d_{i-1} - d_i)}{2 \cdot \tan(\alpha_i)}$ , мм; 4. Время прохода элементарной точки поверхности

проволоки через зоны деформации волок:  $t_i = \frac{l_i}{V_i}$ , с; 5. Относительное обжатие

проволоки:  $\delta_i = \frac{(d_{i-1})^2 - (d_i)^2}{(d_{i-1})^2}$ ; 6. Скорость деформации:  $\xi_i = \frac{\delta_i}{t_i}$ , 1/с; 7. Итоговая

логарифмическая деформация для каждой волоки:  $\varepsilon \Sigma_i = \ln \left[ \frac{(d_0)^2}{(d_i)^2} \right]$ ; 8. Сопротивление

пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения в зависимости от деформационного упрочнения  $\sigma S_i$ . Определяется по зависимости  $\sigma S_i = f(\varepsilon \Sigma_i)$ , МПа; 9. Коэффициент влияния скорости деформации на сопротивление пластической деформации  $Z_i$ . В зависимости от значений максимальных температур в очаге деформации выбирается соответствующая формула из справочных данных, по которой ведется расчет параметра  $Z_i$ ; 10. Сопротивление пластической деформации проволоки для каждого перехода волочения в зависимости от деформационного и скоростного упрочнения  $\sigma S_i$ :  $\sigma_i = Z_i \cdot \sigma S_i$ , МПа;

11. Модуль упрочнения проволоки:  $w_i = \frac{\sigma S_i - \sigma S_{i-1}}{\mu_i - 1}$ , МПа; 12. Коэффициент, определяющий

степень противонапряжения проволоки:  $K_i = e^{2\pi \cdot z_{i-1} \cdot f_w}$ ;

13. Напряжение волочения:

$$\sigma v_i = \sigma_i (1 + 2f) - \frac{(w_i - \sigma S_{i-1}) \left[ (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}} - 1 \right]}{\frac{f}{\tan(\alpha_i)} \cdot (\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} - \frac{\sigma S_{i-1} - \left( \frac{\sigma v_{i-1}}{K_i} \right)}{(\mu_i)^{\frac{f}{\tan(\alpha_i)}}} + 4m_i f \sigma_i$$

, МПа;

14. Коэффициент запаса волочения:  $\gamma_i = \frac{\sigma v_i}{\sigma S_i}$ ; 15. Радиальное нормальное напряжение в

очаге деформации:  $\sigma_r = -(\sigma_i - \sigma v_i)$ , МПа; 16. Среднее напряжение очага

деформации:  $\sigma \sigma_i = \frac{2\sigma_i + \sigma v_i}{3}$ , МПа; 17. Коэффициент напряженного состояния очага

деформации:  $k_i = \frac{\sqrt{3} \cdot \sigma \sigma_i}{\sigma S_i}$ ; 18. Интенсивность сдвиговой деформации разрушения

$A_{pi}$ . Определяется из зависимостей  $A_{pi} = f(k_i)$ ; 19. Интенсивность деформации сдвига в очаге

деформации:  $\Lambda_i = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \ln \left[ \frac{(d_{i-1})^2}{(d_i)^2} \right]$ ;

20. Степенной коэффициент  $a_0$  для коэффициента запаса пластичности  $\Psi$  определяется

с помощью компьютера из следующего уравнения:  $\Psi_{\text{баз}} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Lambda_i}{\Lambda_{pi}} \right)^{(a_0)^{(1+0,238 \cdot k_i)}}$ ,

где  $n$  - количество волок в маршруте волочения;

21. Скорость тяговых шайб:  $B_{i-1} = \frac{B_i}{\mu_i}$ , мм/с; 22. Относительное скольжение проволоки

по поверхности тяговых шайб:  $C_i = \frac{B_i - V_i}{B_i}$ .

На этом этапе расчет базового процесса заканчивается. Далее вводятся предлагаемые изменения в режим волочения базового процесса с целью его оптимизации. По аналогии с базовым процессом формируются исходные данные для измененного процесса с изменением

предлагаемых для оптимизации режимов волочения с сохранением величины конечного диаметра проволоки и ее свойств в конце волочения.

Расчет измененного процесса выполняется в соответствии с измененными исходными данными по пунктам 1-22 расчета базового процесса с добавлением следующих пунктов:

23. Степень коэффициента запаса пластичности:  $\alpha_i = (\alpha_0)^{(1-0,238k_i)}$ ;

24. Частный коэффициент запаса пластичности для каждого прохода

волочения:  $\psi_i = \left( \frac{\Lambda_i}{\Lambda p_i} \right)^{\alpha_i}$  ;

25. Коэффициент запаса пластичности для всего маршрута волочения:  $\psi = \sum_{i=1}^n \psi_i$  .

Если полученное значение  $\Psi$  меньше или равно  $\Psi_{баз}$ , то измененный процесс можно принять как оптимизированный, если полученное значение  $\Psi$  больше  $\Psi_{баз}$ , то изменения в процессе волочения приведут к переупрочнению проволоки и к ухудшению ее свойств.

Также следует проанализировать изменения в величинах относительного скольжения, которые должны оставаться в допустимых пределах.

Например, значение критерия до оптимизации 0,8. Это значение обеспечивает нормальную технологичность проволоки при свивке, которая оценена на производстве. После увеличения скорости на 1 м/с критерий стал равен 0,84. С целью снижения этого значения до 0,8, при увеличенной скорости, проводятся изменения в переходных диаметрах волок по указанной методике. Эти циклы повышения скорости продолжаются до тех пор, пока присутствует возможность возврата значения критерия до исходного уровня.

Для примера проведен расчет маршрута волочения проволоки  $\varnothing 0,412$  мм сталь 90. Для выяснения влияния коэффициент контактного трения в волоке  $f$  на величину  $\Psi$  проведен расчет измененного процесса, в котором величина  $f$  уменьшена до 0,02. В результате расчета получено  $\Psi=0,553$ . Снижение контактного трения привело к уменьшению  $\Psi$  с 0,8 до 0,553. Это означает, что резерв пластичности проволоки увеличился при сохранении ее прочностных характеристик. Таким образом, получено дополнительное подтверждение вывода о необходимости снижения контактного трения для снижения трещинообразования в проволоке.

Предлагаемая методика, основанная на вычислении предельных деформаций, может использоваться для оценки влияния изменения других параметров волочения на пластические свойства получаемой проволоки. Таким образом, она позволяет оценивать критические режимы волочения, снижающие качество проволоки.