

УДК: 004.942

Компьютерное исследование инструмента для изготовления проволоки

О. М. Огородникова^а, Е. М. Бородин, А. А. Гудин

Уральский федеральный университет,
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

E-mail: ^а o.m.ogorodnikova@bk.ru

Получено 20 мая 2014 г.

В данной работе средствами программы DEFORM-2D исследовано напряженное состояние инструмента при волочении упрочненного сплава Pt–Ni эквиатомного состава при комнатной температуре. Рассмотрены различные варианты геометрии алмазного инструмента при неизменных габаритных размерах оправы. Обоснована принципиальная возможность снизить жесткость волоки без изменения параметров технологического процесса.

Ключевые слова: DEFORM-2D, метод конечных элементов, волочение, проволока, сплавы платины

A computational study of tool for wire drawing

O. M. Ogorodnikova, E. M. Borodin, A. A. Gudin

Ural Federal University, 19 Mira Street, Ekaterinburg, 620002, Russia

Abstract. — In this paper, stresses in tool for drawing of equiatomic Pt–Ni alloy at room temperature were investigated by means of DEFORM-2D software. Different variants of the diamond tool geometry were analyzed at constant overall dimensions of workholder. It was shown that the rigidity of the die could be reduced without changing the process parameters.

Keywords: DEFORM-2D, Finite Element Method, Drawing, Wire, Platinum Alloys

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 983–989 (Russian).

Введение

Повышенный интерес наблюдается в последнее время у исследователей к платиновым сплавам, включая упорядочивающиеся сплавы Pt–Ni, в связи с уникальными каталитическими и электротехническими характеристиками этих сплавов и возможностью применения в новейших высокотехнологических отраслях индустрии [Attard et al., 2014; Panciera et al., 2014]. В частности, из проволоки изготавливаются тканые или вязаные катализаторные сетки с активированной поверхностью различного плетения [ОЦМ, 2014].

Изготовление проволоки из сплавов на основе благородных металлов с повышенными конструкционными и функциональными свойствами сопровождается особыми требованиями к эффективности и экономии ресурсов [Огородникова, Литвинов, 1993], выполнению которых способствуют современные методы конечно-элементного моделирования технологических процессов [Огородникова, 2012; Огородникова, 2009]. Компьютерное моделирование технологических процессов изготовления проволоки способом волочения целесообразно проводить в специализированной программе DEFORM-2D на двухмерных конечных элементах с учетом осевой симметрии заготовки и инструмента [Lee et al., 2012]. При волочении происходит упрочнение материала, поэтому важной составной частью компьютерного моделирования является установление предельной степени деформации, при которой не происходит обрыв проволоки.

Поскольку производительность во многом зависит от стойкости волочильного инструмента и определяется уровнем напряжений в контактной зоне, в данной работе была поставлена задача средствами программы DEFORM-2D исследовать напряженное состояние инструмента в процессе волочения сплава Pt–Ni.

Вычислительная модель

Для решения поставленной задачи создана вычислительная модель, которая включает цилиндрическую заготовку и волоку (рис. 1) с диаметром калибрующего отверстия 0.5 мм в соответствии с ГОСТ 6271-90 [ГОСТ, 1990]. Основные размеры волокни соответствуют типу Т, предназначенному для холодного волочения металлов и сплавов с временным сопротивлением разрушению более 500 МПа.

В препроцессоре выбраны опции, редуцирующие модель технологического процесса до двухмерной осесимметричной сетки и изотермического деформирования на этапе установившегося процесса. Трехмерное распределение расчетных параметров может быть получено в постпроцессинге вращением плоского полусечения относительно оси симметрии.

Геометрическая модель. Геометрическая модель волокни построена замкнутыми контурами в продольном сечении таким образом, что алмазный инструмент запрессован в матрицу из карбида вольфрама. При компьютерном исследовании инструмента габаритные размеры матрицы и оправы остаются постоянными, а в конструктивных модификациях варьируются линейные размеры алмазной рабочей зоны.

Модели поведения материалов. Волочение эквивалентного сплава Pt₅₀Ni₅₀ производится в разупорядоченном и рекристаллизованном состоянии после высокотемпературного отжига. В исходном состоянии сплав имеет монофазную структуру с кристаллической решеткой ГЦК (гране-центрированная кубическая) и равноосную зеренную микроструктуру, что позволяет принять допущение об изотропности материала заготовки.

Степенная зависимость изменения механических свойств заготовки при пластическом деформировании конкретизирована аппроксимацией экспериментальных кривых деформационного упрочнения в истинных координатах. Необходимые эмпирические данные получены нами ранее [Огородникова, Литвинов, Саханская, 1990] на проволочных образцах аналогичного диаметра в условиях одноосного растяжения со скоростью 3 мм/сек. Используемая в вычислительной

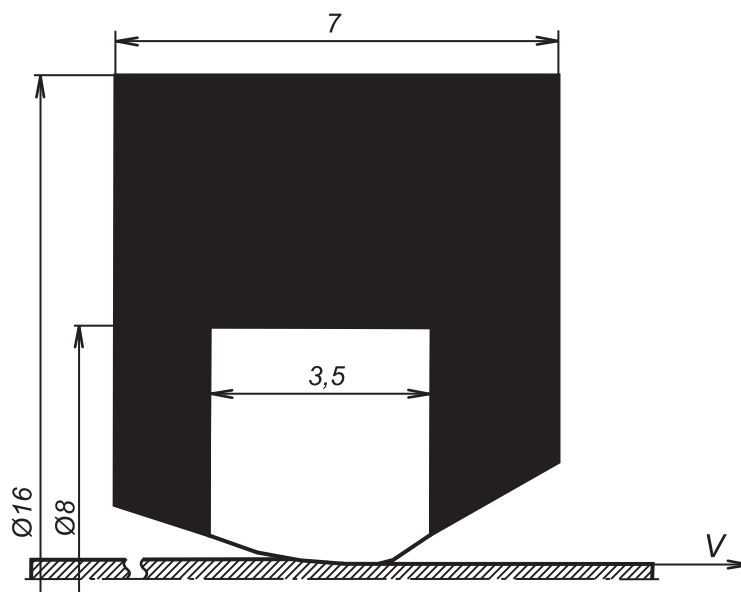


Рис. 1. Геометрия инструмента и заготовки в продольном сечении

модели зависимость напряжений σ от пластической деформации ε имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 + x \varepsilon^y = 580 + 1610 \varepsilon^{0.59}. \quad (1)$$

Волока рассматривается как упругое тело. Поведение материалов инструмента определяется значениями модуля нормальной упругости и коэффициента поперечного сжатия, по умолчанию извлеченными из встроенной базы данных DEFORM.

Граничные и начальные условия. Граничные и начальные условия приложены к половине продольного сечения с положительными пространственными координатами. На границе алмазного инструмента и матрицы заданы контактные условия, исключающие взаимное осевое перемещение. Оправа неподвижна: ограничение степеней свободы применяется к внешнему цилиндрическому контуру матрицы, граничащему с оправой, в виде нулевых значений скорости. Движение заготовки обусловлено осевой скоростью $V = 3$ мм/с, приложенной к внешнему контуру в области захвата.

На поверхностях контакта инструмента и заготовки действуют кинематические граничные условия, согласно которым частицы обрабатываемого материала не могут геометрически проникать через контактную поверхность. Это означает, что для всех точек в зоне контакта проекция вектора скоростей перемещения материала заготовки на внешнюю нормаль к поверхности контакта будет удовлетворять неравенству:

$$v_i n_i \leq 0, \quad (2)$$

где v_i — вектор скорости перемещения, n_i — вектор единичной нормали.

Сила трения f на контактной поверхности противоположна скорости и определяется соотношением:

$$f_i = \sigma_{ij} v_j = -\psi \tau, \quad (3)$$

где σ_{ij} — тензор напряжений, τ — интенсивность касательных напряжений, ψ — коэффициент трения.

Граничное условие 2 учитывалось методом штрафов. Коэффициент трения на поверхности контакта «инструмент–заготовка» принят постоянным и задан равным $\psi = 0.015$. В общем случае коэффициент контактного трения при холодном волочении зависит от качества поверхности обрабатываемой проволоки и рабочего канала инструмента, от геометрии рабочего канала волоки, от свойств технологической смазки, от суммарной степени деформации обрабатываемой проволоки, которая, в свою очередь, отражает деформационное упрочнение и скорость протяжки проволоки через волоку. Все перечисленные параметры принципиально важны и тщательно подбираются при изготовлении стальной проволоки [Колмогоров, 2001]. Малая величина трения назначена в нашей вычислительной модели, поскольку в анализируемом технологическом процессе используется смазка и деформированию подвергается сплав на основе благородного металла с повышенной пластичностью в бестекстурном рекристаллизованном состоянии [Огородникова, Литвинов, Саханская, 1990]. Для сплавов платины экспериментально определенные коэффициенты трения в литературных источниках отсутствуют, в своем выборе мы ориентировались на известные в кабельной промышленности коэффициенты трения при волочении медной проволоки через алмазные волоки [Карпушенко, Золотарев и др., 2001].

Граничное условие 3 входит непосредственно в формулировку вариационного принципа полной мощности π внутренних и внешних сил, используемого в пакете DEFORM-2D:

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV - \int_S F_i \delta u_i dS + K \int_V \epsilon_V \delta\epsilon_V dV = 0, \quad (4)$$

где вариация функционала $\delta\pi$ составлена из слагаемых, представляющих баланс мощности, расходуемой на пластическую деформацию металла в объеме V и преодоление сил трения в области контакта между инструментом и обрабатываемым металлом S . Штрафной коэффициент (пенальти) K перед интегралом объемных изменений имеет физический смысл объемной вязкости и в данном компьютерном исследовании принят равным $K = 10^9$ Па. Величина коэффициента выбрана, исходя из нашей практики вычислительного моделирования в пакете DEFORM [Харионов, Бородин и др., 2011], чтобы обеспечить постоянство объема с точностью до машинного нуля.

Конечно-элементная сетка. Разбиение исходной геометрической модели на треугольные конечные элементы задано неравномерным: наибольшая плотность расчетных узлов достигнута в обжимной зоне волоки. Был проведен анализ влияния плотности конечно-элементной сетки на расчетные результаты по стандартной методике [Огородникова, 2009], и задано оптимальное количество конечных элементов в расчетной сетке. Общее количество элементов в сетке — около 20 тысяч, из них примерно 50% приходится на алмаз.

Алгоритм компьютерного моделирования. Процесс деформирования разбивается на малые временные шаги, и на каждом шаге решается краевая задача расчета полей скоростей и напряжений для несжимаемой вязкопластической среды. Она расщепляется на вариационную задачу нахождения поля скоростей и последующее вычисление тензора напряжений. Задача нахождения скоростей решается в классе непрерывных функций, которые являются многочленами второго порядка от координат на каждом конечном элементе и определяются значениями в узлах. Считая поле скоростей постоянным на текущем временном промежутке, решатель выявляет новую форму заготовки и координаты узлов, корректирует накопленную деформацию. Для каждого конечного элемента по накопленной деформации фиксируются измененные значения локальных механических свойств в соответствии с нелинейной моделью поведения материала.

В решателе использован прямой итерационный метод. Поиск минимума функционала баланса мощности внутренних и внешних сил выполнялся при помощи метода сопряженных градиентов на каждом шаге интегрирования по времени.

Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение

В компьютерном исследовании рассмотрен случай, близкий по интенсивности нагружения к имеющимся экспериментальным данным. Определяемая геометрией рабочего канала относительная степень обжатия заготовки (коэффициент вытяжки) составляет 10 %. Стандартом [ГОСТ, 1990] для выбранного типа волокна рекомендуется превышение исходного диаметра проволоки над диаметром калибрующего отверстия от 5 до 10 %, что соответствует относительной степени обжатия в интервале 9–17 %.

Первоначальный диаметр проволоки d_0 , протягиваемой через волоку, вычисляется в зависимости от относительного обжатия δ по формуле [ГОСТ, 1990]:

$$d_0 = \frac{d_{\text{calibr}}}{\sqrt{1 - \delta}}, \quad (5)$$

где $d_{\text{calibr}} = 0.5$ мм — диаметр калибрующего отверстия.

В предельном случае с малым коэффициентом трения и незначительным контактным давлением инструмента соблюдается равенство предела текучести, определяемого с учетом упрочнения металла, и осевого напряжения на выходе рабочего конуса волокна. По достижении предельного случая абсолютный запас прочности становится равным нулю, и наступает разрушение переднего конца заготовки, или возникает его внеконтактная деформация за волокой [Перлин, Ерманок, 1971].

Как показывают наши расчеты, можно снизить уровень напряжений, изменив геометрию инструмента. Анализируя напряженно-деформированные состояния в компьютерных исследованиях, большинство исследователей варьирует и оптимизирует рабочий канал волокна без учета упругих деформаций инструмента, но существенным фактором оказывается также и внешний контур инструмента. В частности, представляют интерес варианты конструкции с менее жесткими сечениями.

Мы рассмотрели ряд размерных вариантов внешнего контура волокна. Расчетное распределение сжимающих напряжений в контактной зоне волокна (главное напряжение σ_3) для трех конструктивных вариантов показано на рисунке 2. Максимальные по величине напряжения σ_3 в волокне и эквивалентные напряжения Мизеса σ_M в заготовке приведены в таблице 1.

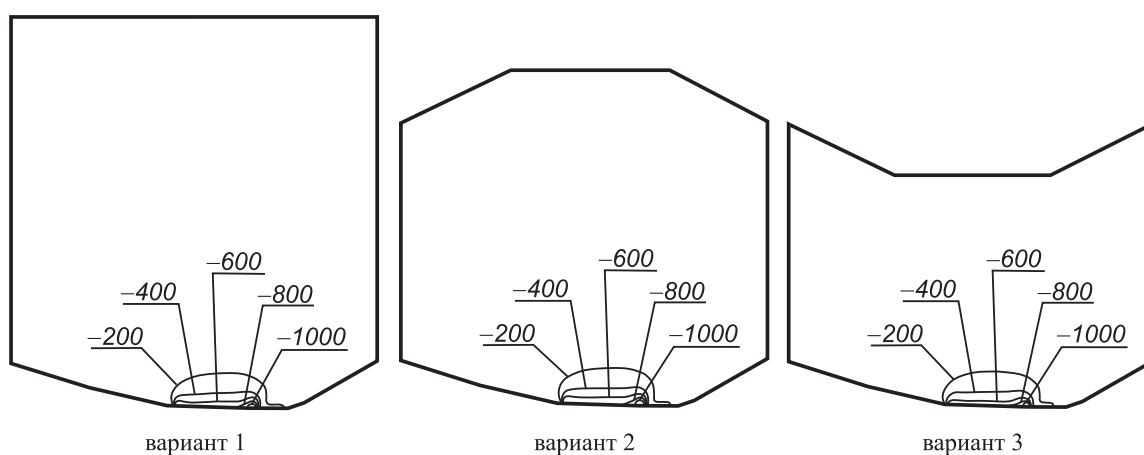


Рис. 2. Распределение сжимающих напряжений в контактной зоне волокна σ_3 , МПа

Исходный вариант с цилиндрическим внешним контуром алмазного инструмента имеет диаметр, соответствующий стандартному габариту. Во втором варианте бочкообразный контур

Таблица 1. Максимальные по величине расчетные напряжения: наименьшее главное напряжение σ_3 в волоке и напряжение Мизеса σ_M в заготовке, МПа

Скорость V , мм/с	Напряжение σ (степень обжатия δ)	вариант 1	вариант 2	вариант 3
3	σ_3 ($\delta = 19\%$)	-1715	-1550	-1400
3	σ_M ($\delta = 19\%$)	1900	1800	1705
3	σ_3 ($\delta = 10\%$)	-1460	-1325	-1220
3	σ_M ($\delta = 10\%$)	1715	1600	1540
1	σ_3 ($\delta = 10\%$)	-1160	-1115	-1010
1	σ_M ($\delta = 10\%$)	1385	1350	1295

эквидистантно повторяет изопараметрическую поверхность равных значений сжимающих напряжений. В третьем варианте предлагаемый нами вогнутый внешний контур снижает жесткость инструмента и уровень наибольших по величине напряжений на 20% как в алмазном инструменте, так и в металлической заготовке. Во всех вариантах волоки удаленные от контактной поверхности изолинии напряжений имеют одинаковый вид, что было обеспечено нами за счет подбора радиальных размеров. Основное различие заключается в уровне максимальных по величине напряжений локально в концентраторе напряжений, который находится в выходном сечении волоки и приводит по мере износа к формированию канавки (см. таблицу 1). При этом в нашей волоке не происходит релаксация упругих напряжений, а уровень напряжений на поверхности контакта вблизи опасного концентратора снижается за счет меньшей жесткости сечения. Немаловажно также, что попутно мы экономим массу алмаза.

В проведенном нами вычислительном эксперименте моделированию подвергнут процесс силового нагружения проволоки с теми параметрами, которые были нами ранее получены в эксперименте. Для сравнения вычисления проведены и для меньшей скорости волочения, которую мы рекомендуем реализовать в технологическом процессе.

Заключение

Методом конечных элементов исследован процесс холодного волочения платинового сплава, упрочненного легированием. Предложена геометрия волоки, понижающая жесткость инструмента и уровень напряжений.

Список литературы

- ГОСТ 6271-90. Волоки алмазные. Технически условия. — М.: Издательство стандартов. — 1991. — 9 с.
- Карпушенко В. П., Золотарев В. М., Бузько С. В., Науменко А. А. Определение усилия волочения круглых профилей // Кабели и провода. — 2008. — № 2. — С. 26–31.
- Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. — Екатеринбург: Издательство УГТУ-УПИ. — 2001. — 689 с.
- Огородникова О. М., Литвинов В. С. Кинетика упорядочения сплавов платина-никель-медь по типу L1₀ // Физика металлов и металловедение. — 1993. — Т. 75, № 6. — С. 113–117.
- Огородникова О. М. Исследовательская функция программ CAE в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM // Вестник машиностроения. — 2012. — Вып. 1. — С. 25–31.
- Огородникова О. М. Компьютерный инженерный анализ. — Екатеринбург: УрФУ. — 2009. — 205 с.
- Огородникова О. М., Литвинов В. С., Саханская И. Н. Текстура, структура и пластичность упорядоченного сплава NiPt // Физика металлов и металловедение. — 1990. — Т. 70, № 7. — С. 147–151.

- Перлин И. Л., Ерманок М. З.* Теория волочения. — М.: Металлургия. — 1971. — 447 с.
- Сайт изготовителя:* Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.ez-ocm.ru/catalog>, свободный. — 2014.
- Харитонов В. В., Бородин Е. М., Бородин М. Ю., Ананьев А. В.* Конечно-элементное моделирование непрерывной прокатки труб. — Екатеринбург: УрФУ. — 2011. — 139 с.
- Attard G. A., Ye J. Y., Brew A. A. et al.* Characterisation and electrocatalytic activity of PtNi alloys on Pt{111} electrodes formed using different thermal treatments // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. — 2014. — Vol. 716. — P. 106–111.
- Lee S. K., Kim D. W., Jeong M. S., Kim B. M.* Evaluation of axial surface residual stress in 0.82-wt% carbon steel wire during multi-pass drawing process considering heat generation // *Materials and Design*. — 2012. — Vol. 34. — P. 363–371.
- Panciera F., Hoummada K., Perrin C. et al.* Ni(Pt)-silicide contacts on CMOS devices: Impact of substrate nature and Pt concentration on the phase formation // *Microelectronic Engineering*. — 2014. — Vol. 120. — P. 34–40.