



УДК 539.3

## РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ ИСТИННОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Пенкин

НОиИЦ «Наноструктурные материалы и нанотехнологии»,  
ул.Королева , 2а, Белгород, 308034, Россия, e-mail: [penkin\\_av@bsu.edu.ru](mailto:penkin_av@bsu.edu.ru)

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты моделирования методом конечных элементов в среде ANSYS величины истинной деформации( $\epsilon$ ) задаваемой при изотермической винтовой прокатке титана ВТ1-0 (вытяжка  $\mu=1.8$ ). Получена количественная картина распределения  $\epsilon$  по сечению образца. Обсуждается достоверность полученных результатов моделирования путем их сравнения с результатами натурального эксперимента.

**Ключевые слова:** поперечно-винтовая прокатка, истинная деформация, интенсивная пластическая деформация, микроструктура.

**1. Введение.** Вопрос об определении величины истинной деформации при любом виде интенсивной пластической деформации (ИПД) всегда ставился во главу угла, когда речь заходит об измельчении структуры во время обработки металла давлением (ОМД) [1]. Структурные преобразования в материале напрямую зависят именно от степени накопленной пластической деформации. Определение величины истинной деформации при поперечно-винтовой прокатке достаточно сложный вопрос из-за сложности напряженно-деформируемого состояния при поперечно-винтовом деформировании. Принято [2], что величина степени истинной (логарифмической) деформации  $\epsilon$  – при поперечно-винтовой прокатки является величиной аддитивной и складывается из двух слагаемых  $\epsilon_K$  и  $\epsilon_B$ . Здесь  $\epsilon_B = \ln(d_H/d_K)^2$  – логарифмическая деформация вытяжкой, где  $d_H$  и  $d_K$  – начальный и конечный диаметр заготовки соответственно, а  $\epsilon_K = \ln(90^\circ/\gamma)$  – величина логарифмической деформации при кручении. Если определение  $d_H$  и  $d_K$  не составляет трудностей, то для определения  $\gamma$  угла подъема винтовой линии на прокатываемый пруток необходимо заранее нанести метку в виде бороздки на поверхности прутка.

В [1] при расчете истинной деформации при кручении используется другая модель, согласно которой  $\epsilon_K = (\text{tg } \gamma)/3^{0.5}$ , где  $\gamma$  – угол подъема винтовой линии.

В принципе, обе эти формулы дают достаточно адекватные оценки величины  $\epsilon$ , но только если дело касается поверхности образца, поскольку угол подъема винтовой линии виден только лишь на поверхности. Однако, не менее, а даже более интересен вопрос о распределении величины истинной деформации в поперечном сечении прокатываемого прутка.

Цель данной работы состоит в моделировании методом конечных элементов(МКЭ) распределения величины истинной(накопленной) деформации в поперечном сечении прутка

Традиционные аналитические методы решения задач ОМД, как правило, основаны на анализе упрощенных двумерных моделей процесса деформирования металла. К широко известные из них, например, метод нанесения координатных сеток, поляризационно-оптический метод, метод линий скольжения [3].



Каждый из указанных методов имеет свои достоинства, являлся в свое время новым дополнительным шагом в вопросах изучения напряженно-деформированного состояния, но все они имеют общие недостатки: во-первых, эти методы не дают полной объемной картины распределения каждого из видов напряжений по сечениям прокатываемой заготовки; во-вторых, все перечисленные методы не позволяют напрямую определять абсолютные величины каждого из видов напряжений.

Практические возможности таких аналитических методов достаточно ограничены из-за принятых гипотез и допущений.

В то же время решение ряда практических вопросов технологии ОМД требует более полной и достоверной информации о напряженно-деформированном состоянии металла по сравнению с той, что дают аналитические двумерные модели. Переход к объемным задачам обработки металлов давлением возможен только на основе использования современных численных методов анализа. В работах [4, 5] опубликованных еще в 1975-1985 гг., было показано что наиболее эффективным методом решения технологических задач обработки металлов давлением является метод конечных элементов, однако применение его в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, характерный для того времени, сводилось, как правило, к рассмотрению упрощенных плоских моделей.

Развитие вычислительных методов решения дифференциальных уравнений, опирающихся на огромные вычислительные ресурсы современных ЭВМ, позволяет решать эти уравнения для каждого конкретно заданных условий. В этом случае рассматриваются деформации и связанные с ними возникающие напряжения в отдельных исчезающе малых элементах объемного тела.

В работе [6] описано применение МКЭ для моделирования теплой поперечно-винтовой прокатки заэвтектических силуминов. Однако, в качестве модельного материала была выбрана медь М0, а объем оперативной памяти ПК, на котором велось моделирование составлял 512Мбайт, что не могло не сказаться на достоверности полученных результатов.

**2. Метод исследования.** Применяемый в данной работе МКЭ, достаточно эффективен при решении задач обработки металлов давлением, в том числе, и при рассмотрении объемных задач теории прокатки.

Основой решения таких задач является совместное решение уравнений равновесия элементарных объемов, условий объемного сжатия при малых деформациях и несжимаемости материала при больших деформациях, уравнений перехода в пластическое состояние и удовлетворение полученных решений граничным условиям. В общем случае равновесие элементарного объема материала без учета массовых и инерционных сил в случае цилиндрической системы координат описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} = 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0. \end{cases}$$

Условие несжимаемости материала при больших деформациях:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0.$$



Условие пластического перехода может быть представлено в виде поверхности эллипсоида, построенного на осях главных напряжений, размеры которого увеличиваются соответственно принятому закону упрочнения.

Общий подход к решению задач, реализованный в метода конечных элементов, состоит в следующем: математической основой является механика деформации тела, разделенного на параллелепипеды (или иные элементы, например, гексаэдры), с их дальнейшим разделением на тетраэдры, с узлами в их вершинах.

Для моделирования был использован программный пакет ANSYS, который предлагает пользователю широкий набор инструментов для моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки в очаге деформации

Моделировалась теплая поперечно-винтовая прокатка сплошной цилиндрической заготовки, температура прокатки —  $400^\circ$ . Заготовка прокатывалась с диаметра 20 мм на диаметр 15 мм за один проход (вытяжка  $\mu=1.8$ ) в валках, установленных с тангенциальным смещением равным 15 мм. Угол раскатки был принят равным  $55^\circ$ , то есть все настройки выбраны такими, на которых были проведены последующие натурные опыты. Моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки проводилось со следующими допущениями:

- изотермические условия прокатки при  $400^\circ$ ;
- трение в контакте заготовки и валкам подчиняется закону сухого трения: сила трения при скольжении тела о поверхность не зависит от площади соприкосновения тела с поверхностью, но зависит от силы нормальной реакции этого тела и от состояния окружающей среды;
- коэффициент трения постоянен на всей контактной поверхности;
- валки прокатного стана рассматривались как абсолютно жесткие тела;
- для обеспечения гарантированного захвата заготовки её передняя часть имеет форму конуса. Один из важных вопросов, который приходится решать при разработке МКЭ-моделей процессов ОМД — выбор модели поведения материала при деформации. В данном случае была принята билинейная упругопластическая модель, при которой в процессе пластического деформирования зависимость сопротивления металла от степени деформации является линейной и характеризуется модулем упрочнения, который вводится как тангенс угла наклона прямой после предела текучести на стандартном графике  $\sigma = f(\varepsilon)$ . Для этой модели необходимо задать три величины, которые должны быть известны априори: модуль Юнга, модуль упрочнения и предел текучести, которые должны быть определены в результате натурального эксперимента при заданной температуре и на нужном материале. Такой эксперимент был проведен на базе оборудования ЦКП НИУ БелГУ. Для проведения исследований был выбран технически чистый титан марки ВТ1-0, полученный на предприятии ОАО «ВСМПО-АВИСМА» по ОСТ 1-90173. Далее на испытательной машине Instron 5882 было проведено испытание на растяжения при  $400^\circ$  и были получены следующие значения:

Предел текучести (условный) — 155 МПа;

Модуль Юнга — 90 ГПа;

Модуль упрочнения — 75 МПа.

Модель заготовки формируется из трехмерных твердотельных параллелепипедов с упругопластическими свойствами. Прокатные валки моделируются абсолютно жесткими оболочными гексаэдрическими элементами. Коэффициент трения в контакте «заготовка-валок» был принят равным  $\mu=0,35$  исходя из эмпирических соображений.

Общее число конечных элементов в трехвалковой модели — 5331, число узлов — 49644. В качестве глобальной системы координат принята правая декартова система, ось Z которой совпадает с продольной осью заготовки и направлена в сторону выхода металла из валков.



Ось  $Y$  направлена вертикально вверх и совпадает с вертикальной осью «подушки» верхнего валька стана.

Независимой переменной в модели является время, изменяющееся в процессе решения в пределах от 0 до  $t$  с некоторым малым шагом интегрирования  $dt$ . При этом на каждом шаге интегрирования рабочие валки получают приращения по углу поворота вокруг своей оси  $d\phi = \omega dt$ , где  $\omega$  — угловая скорость вращения валков. Принято, что рабочие валки вращаются с постоянной скоростью 20 рад/с. Для стабилизации пространственного положения заготовки в процессе решения центральному узлу конечно-элементной сетки на заднем торце заготовки запрещены перемещения по осям  $X$  и  $Y$ .

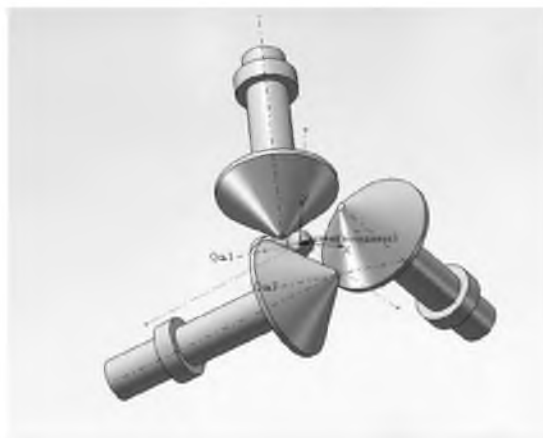


Рис. 1 Геометрическая модель.

**3. Результаты.** Расчеты выполнялись на четырехядерном ПК с процессорами Intel Xeon 2,6 Гц с объемом оперативной памяти 8 Гбайт в среде операционной системы Windows XP в пакете ANSYS. Время выполнения расчета по одному варианту при верхнем пределе интервала интегрирования  $t = 5$  составляло в среднем около 3 часов.

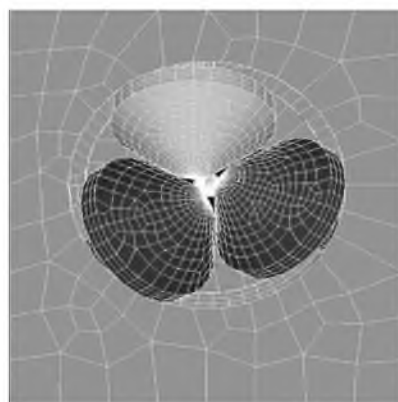


Рис. 2. Модель КЭ.

Геометрическая модель была задана в среде Solid Works (рис. 1) и затем импортирована в расчетчик КЭ (рис. 2).

Далее был произведен расчет по условиям подробно описанным выше. На рис. приведен вид прутка во время его деформирования МКЭ.

На представленном рисунке 3 хорошо виден очаг деформации, а также видны линии скручивания и угол подъема линий скручивания, данные линии весьма характерны для поперечно-винтовой прокатки и по ним можно судить о величине истинной деформации на поверхности прутка. Программа МКЭ-зведения сечений в любой плоскости деформируемой

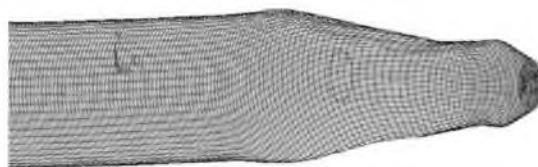


Рис. 3. Пруток во время деформирования.

На рисунке 4 представлено распределение величины истинной деформации в поперечном сечении заготовки во время выхода ее из зоны деформирования



Рис. 4. Распределение величины истинной деформации в поперечном сечении заготовки.

Из рисунка 4 нетрудно заметить, что величина истинной деформации при теплой поперечно-винтовой прокатке, существенно меняется по сечению прокатываемого прутка: если в геометрическом центре прутка это значение близко к нулю, то у поверхности приближается к значению 1,5. Данный разброс значений по сечению прутка не может не сказываться на структуре и механических свойствах прутка.

На представленном рисунке можно выделить две зоны:

- зона №1, которая начинается в центре прутка и заканчивается примерно на одной трети радиуса;
- зона №2, которая начинается примерно от одной трети радиуса прутка и заканчивается на его поверхности.

**4. Обсуждение и выводы.** Ранее в [7] был дан расчет истинной деформации при поперечно-винтовой прокатке титана ВТ1-0 диаметра 20 мм на 15 мм при 400°. Это величина составила 1,3, что хорошо согласуется с данными, полученными из расчета. Обращает на себя внимание и большой перепад данного значения по сечению прутка, своеобразное «расслоение» прутка на две зоны в поперечном сечении, что так же согласуется с ранее полученными данными [8–10].



Таким образом, можно заключить, что построенная модель достаточно адекватно описывает реальный процесс изотермической поперечно-винтовой прокатки, по крайней мере, в части описания величины накопленной деформации.

Однако в реальном эксперименте в процессе прокатки существенно изменяется микроструктура, а значит и механические свойства материала, что не учитывается в модели, в связи с этим к результату, полученному при моделировании процессов пластической деформации нужно относиться с осторожностью, тщательно проверяя как именно параметры, взятые из натуральных экспериментов оказывают влияние на поведение модели.

В результате математического моделирования величины истинной деформации при поперечно-винтовой прокатке была получена количественная картина распределения указанной величины в поперечном сечении прутка. Проведенный натуральный эксперимент с такими же условиями деформирования, как и в модели, подтвердил достоверность результатов моделирования, показав сходимость результатов: разница между величиной истинной деформации в эксперименте и по результатам моделирования не превышает 15%.

Установлено, что величина истинной деформации существенно (примерно в восемь раз) меняется по сечению образца: плавно растёт от 0,2 в центральной части до 1,6 на периферии.

### Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Патент №2038175 RU С1. Способ получения прутков из легированных металлов и сплавов / Галкин С. П., Карпов Б.В., Михайлов В.К. и др. Бюллетень № 18 за 1995.
3. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела / М.: Наука, 1973. – 576 с.
4. Зенкевич О., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред / М.: Мир, 1974. – 240 с.
5. Сагерланд Л. Применение метода конечных элементов в технике / М.: Мир, 1975. – 540 с.
6. Панов Е. И. Разработка теоретических основ, технологии и оборудования для повышения пластических свойств малопластичных заэвтектических силуминов методом поперечно-винтовой прокатки / дис. д-ра техн. наук: 05.03.05 / Москва: РГБ, 2007.
7. Пенкин А. В., Голосов Е. В., Иванов М. Б., Колобов Ю. Р.: Особенности формирования УМЗ структуры в прутках из нелегированного титана при различных видах тепловой винтовой прокатки / Сб. тез. 17-й международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов», 23-25 июня 2009г., Самара, Россия.
8. Шаповал А.Н., Горбатюк С.М., Шаповал А.А. Интенсивные процессы обработки давлением вольфрама и молибдена / М: Издательский дом «Руда и Металлы», 2006.
9. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовая прокатки. 2-е изд., перераб. и доп / М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
10. Иванов М.Б., Пенкин А.В., Колобов Ю.Р., Голосов Е.В., Нечаенко Д.А., Божко С.А. Теплая поперечно-винтовая прокатка в валках конической формы как метод интенсивной пластической деформации // Деформация и разрушение материалов №9(2010).



**CALCULATION OF GENUINE STRAIN AT HELICAL ROLLING:  
MODELING BY FINITE ELEMENT METHOD**

**A.V. Penkin**

Centre of nanostructural materials and nanotechnologies,  
Koroleva St., 2a, Belgorod, 308034, Russia, e-mail: [penkin\\_av@bsu.edu.ru](mailto:penkin_av@bsu.edu.ru)

**Abstract.** Results of finite element modeling in ANSYS value genuine strain in titanium rod defined by isothermal rolling screw ( $\mu = 1.8$ ) are presented. Quantitative picture of genuine strain distribution over the cross section of the sample are obtained. The reliability of the simulation results by comparing them with the results of a natural experiment have been discussed.

**Key words:** helical rolling, true strain, severe plastic deformation, microstructure.