

Брынских Я.А., Бабайлова А.Н., студенты
Буркин С.П., проф., канд. техн. наук

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НДС ВСЕСТОРОННЕЙ КОВКИ

В современной технологии получения холоднокатаных изотропных листов из тугоплавких металлов обязательной операцией в изготовлении сутунки является ковка первоначально горячая, затем теплая. Исходная заготовка, отлитая в графитовую изложницу при вакуумно-дуговой плавке, имеет крупнозернистую иногда дендритную структуру, требующую для повышения пластичности перед теплой и холодной прокаткой интенсивной деформации либо прессованием, либо всесторонней ковкой. Чем крупнее исходное зерно, тем большая суммарная степень деформации в состоянии обеспечить благоприятные механические свойства. Поскольку ковка заканчивается в теплом состоянии при определенной текстурированности металла, при прокатке следует учитывать преимущественную направленность течения металла при ковке, что сделать достаточно сложно без анализа деформированного состояния. Если прокатная заготовка сравнительно изотропна, то схема прокатки существенно упрощается – достаточно выровнять относительные суммарные обжатия при прокатке в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При исходной анизотропии, унаследованной послековки, схема прокатки становится неопределенной. Неоднородность деформации в объеме ковкой заготовки является следствием как неравенства степеней деформации в направлении трех взаимно перпендикулярных, так и неоднородных температурных полей в объеме заготовки.

В настоящей работе выполнена конечно-элементная постановка связанной задачи расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и распределения температуры. Постановка и решение задачи в пакете прикладных программ DEFORM-3D* позволили рассмотреть последовательность операцийковки с паузами для кантовки заготовки и смены инструмента. Достоинством новой актуальной схемы трехстороннейковки цилиндрической заготовки является возможность восстановления в цикле исходной конфигурации и, следовательно, неоднократного повторения цикла со сменой осей направленности деформаций. При постановке учитывается возможность выравнивания температуры в объеме и варьирование коэффициента теплоотдачи от заготовки к инструменту. Управление этим коэффициентом на практике достигается напылением на рабочие поверхности деформирующего инструмента диоксида циркония (Zr_2O) заданной толщины. За счет напыления формируется промежуточный слой с тепловым сопротивлением S/λ (S – толщина напыленного слоя; λ – теплопроводность), за счет которого в широких пределах меняется коэффициент теплопередачи от заготовки к инструменту.

* Лицензия кафедры ОМД УГТУ-УПИ

Конкретное решение в данной постановке выполнено для анализаковки молибденовой литой цилиндрической заготовки диаметром $d_0=55$ мм и высотой $h_0=72$ мм. Ковка проводится на вертикальном гидравлическом прессе 2,5 МН, рабочее пространство которого герметизировано и заполнено защитным газом, предотвращающим окисление молибдена в течение всего этапаковки. Поскольку нагревательное устройство также помещено в камеру, то возможен как исходный нагрев заготовки до 1600°C , так и подогревы до $1300\text{...}1400^{\circ}\text{C}$ (в случае необходимости). Все манипуляции с заготовкой осуществляет автоматизированный программируемый манипулятор.

В задаче рассмотрены только последовательно выполняемые ковочные операции одного цикла.

Геометрическая постановка задачи для трех операций показана на рис. 1.

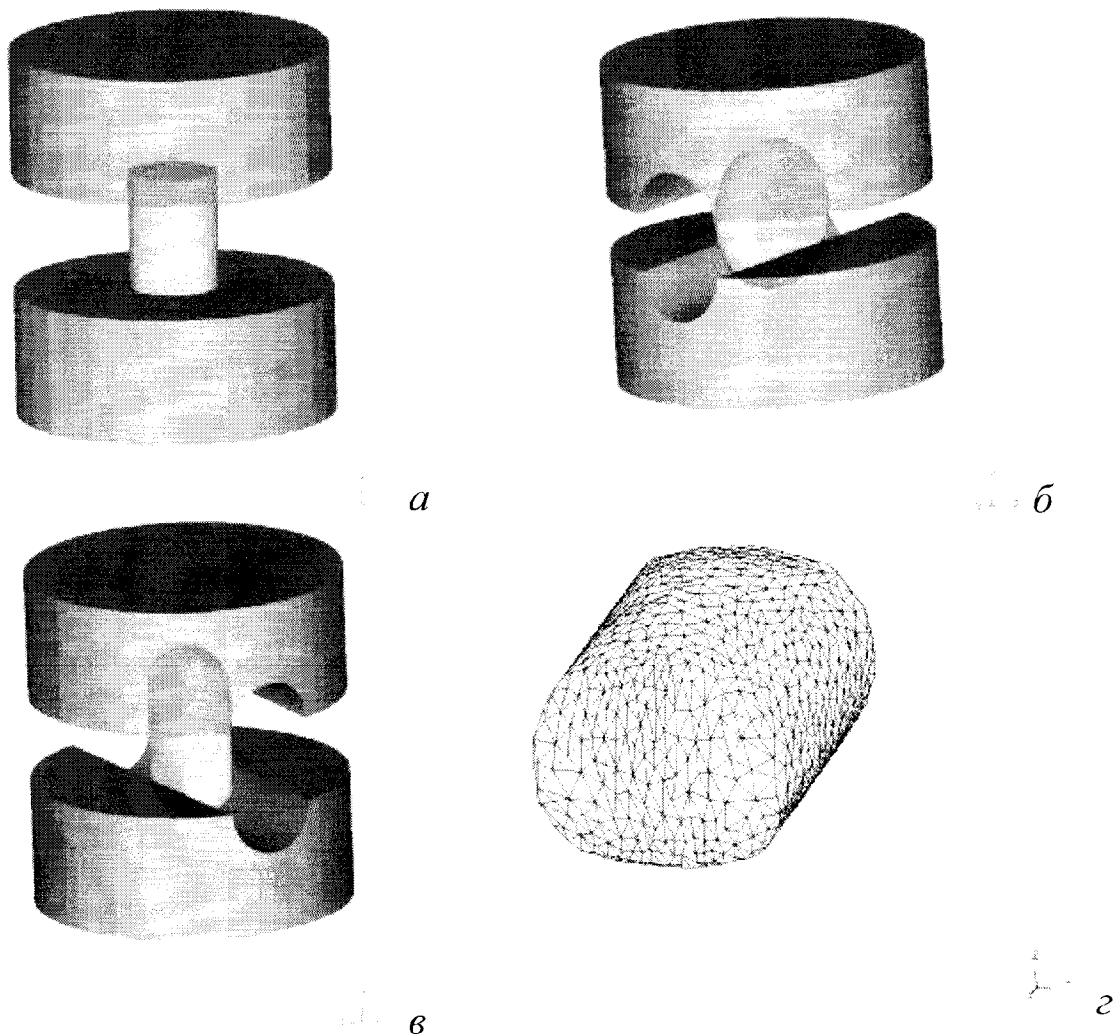


Рис. 1. Последовательность операций всестороннейковки цилиндрической заготовки:

a – осесимметричная осадка на гладких плитах в направлении оси *Z*; *б* – осадка по диаметру в вырезных бойках в направлении оси *X*; *в* – осадка в вырезных бойках в

направлении оси Y ; z – цилиндрическая поковка, формируемая в циклековки с восстановлением исходной конфигурации

Осесимметричная осадка с логарифмическим обжатием $\varepsilon=0,8$ проводится на подогретых до 400°C бойках, на рабочие поверхности которых напылен Zr_2O толщиной $0,2$ мм. На второй операции (рис. 1, б) используются бойки с радиальными вырезами радиусом $R = d_0/2$. Осадка проводится до смыкания плоскостей бойков, поэтому заготовка приобретает высотный размер d_0 . После кантовки осадка вдоль оси Y проводится также до смыкания бойков. При этом заготовка приобретает форму и размеры, близкие к исходным. Если циклковки будет повторен, то первая осадка выполняется вдоль оси X ; вторая либо Z , либо Y . За три цикла осевые деформации выравниваются и заготовка оказывается близкой изотропной. По завершении уковки заготовка расплющивается на гладких бойках и протягивается до конфигурации сутунки. Рациональный выбор обжатий в цикле с выравниванием деформаций по трем взаимно перпендикулярным осям показан ранее в работе [Буркин С.П., Бекетов А.Р., Обабков Н.В. и др. Анализ технологии изготовления изотропных листов из тугоплавких металлов /Производство проката. 2006. № 7. С. 18-23].

В результате решения получены распределения по объёму степеней деформации сдвига, накопленных в цикле деформирования, и температуры с учетом интенсивной теплоотдачи ($10 \text{ кВт/м}^2\text{К}$) теплопроводностью через сравнительно холодные бойки и частично выравнивание температуры в объёме заготовки во время пауз между операциями. Пауза на передачу заготовки из печи к бойкам прессы равна 12 с, а паузы между операциями по 15 с. Во время пауз учитываются теплотери излучением и конвекцией. Потери тепла теплопередачей от заготовки к губкам захвата манипулятора не учитываются. В основном объёме заготовки полученное относительное распределение как степени деформации, так и температуры. Аномальными зонами являются поверхностные, особенно вступающие в контакт с инструментом на разных этапах обжатия. Для оценки максимальных градиентов анализируемых параметров рассмотрены реперные точки, показанные в исходной конфигурации на рис. 2.

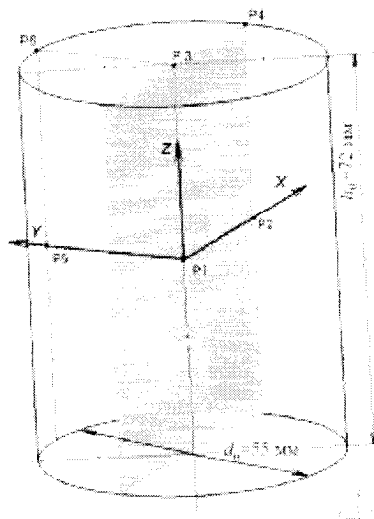


Рис. 2. Положение реперных точек на исходной конфигурации цилиндрической заготовки

Изменение температуры в отмеченных реперных точках за все время обработки заготовки в цикле (63 с) показано на рис. 3. Разрыв металла в центральных зонах пренебрежительно мал (точка 1) и его можно не учитывать в каждом цикле обработки. Первое обжатие начинается через 12,5 с после выноса из печи заготовки, нагретой на 1600°C. За время переноса за счет излучения и конвенции температура на поверхности снижается на 6...10°C. Длительность деформации составляет 2,5 с при каждом обжатии. Температура интенсивно снижается в точках контакта с инструментом. Максимальное снижение температуры составляет $\approx 100^\circ\text{C}$. После завершения цикла обработки температура выравнивается и стремится к уровню 1550°C, что позволяет без дополнительного нагрева осуществлять следующий цикл обработки. Даже для молибдена, легированного титаном и цирконием (сплав ЦМ-2А), температура завершения цикла обработки остается выше температуры начала рекристаллизации. Следовательно, первый цикл можно отнести к горячей обработке. При паузе в 120...150 с температура без контакта с инструментом снижается ниже 1400°C и для сплава ЦМ-2А второй циклковки уже проводится в диапазоне теплой деформации.

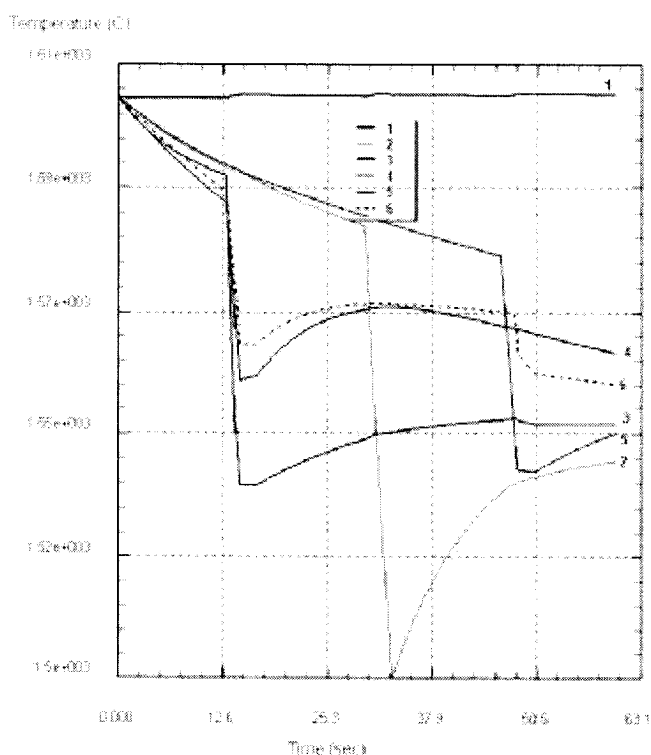


Рис. 3. Изменение температуры в реперных точках заготовки за время цикла обработки

Благодаря сравнительно высокой теплопроводности компактного (после спекания) молибдена и его низколегированных сплавов, по

завершении деформации и небольшой паузы температура быстро выравнивается по объёму заготовок. На рис.4 приведены распределения температуры после завершения цикла обжатия, при этом заготовка 2,5 с оставалась в вырезном бойке и 12 с охлаждалась в атмосфере ковочной камеры, удерживаемая гибким манипулятором. Приведенные в виде изотерм уровни температуры показаны в трех взаимно перпендикулярных плоскостях в соответствии с рис.1, 2. Можно наблюдать достаточно равномерное распределение температуры в объёме. Некоторое снижение температуры до 1530°C наблюдается лишь в достаточно тонком поверхностном слое. Захоложенный поверхностный слой сохраняется и при последующем охлаждении, поскольку охлаждение в атмосфере происходит лишь излучением и конвекцией. Максимальный градиент между центральной зоной заготовки и ее поверхности не превышает 120⁰С в течение всего периода охлаждения. Понятно, что с усилением теплоизоляции контакта заготовки с инструментом перепады температуры в сечениях заготовки могут быть снижены.

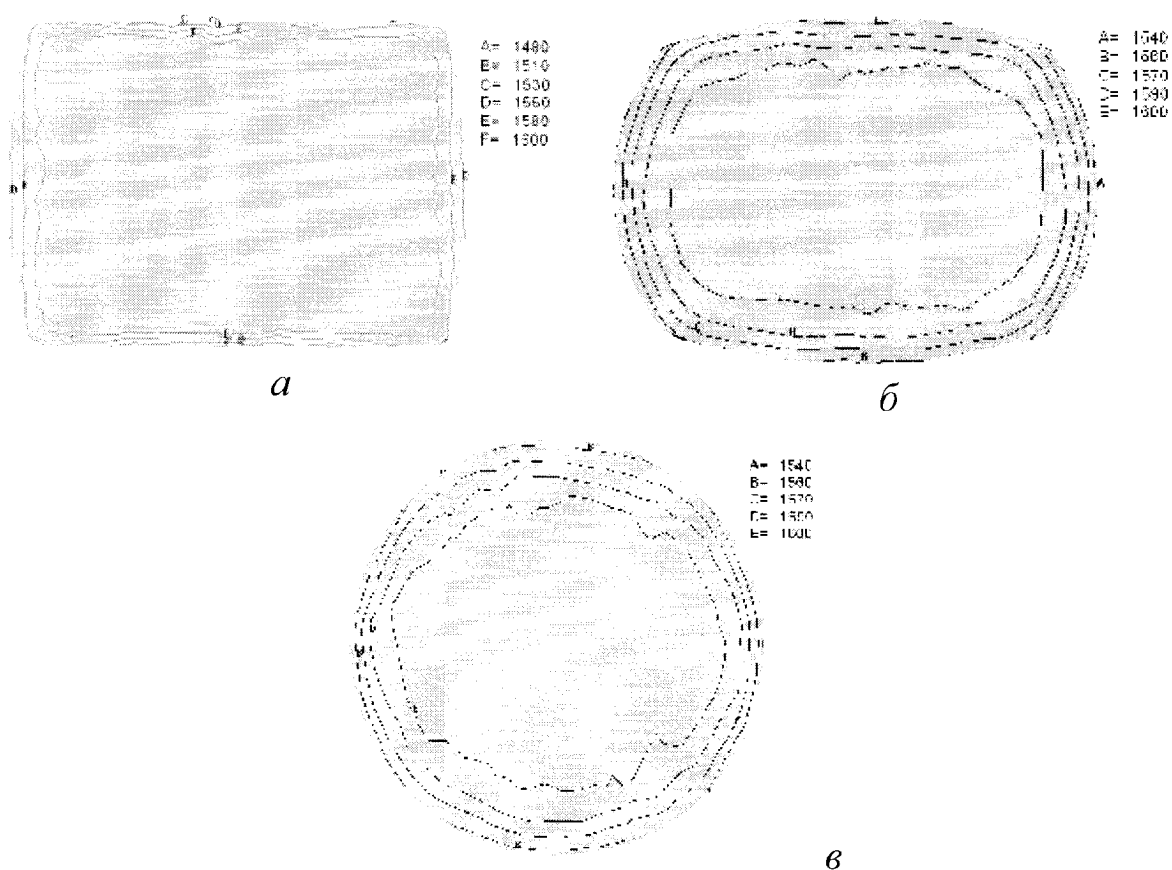


Рис. 4. Распределение температуры в сечениях X-Y (а), X-Z (б), Z-Y (в) после завершения циклаковки и охлаждения в атмосфере в течение 12 с

В рассмотренной конечно-элементной постановке успешно определяются все компоненты тензоров деформации и напряжения. Поскольку поля деформаций рассчитываются на каждом этапе обжатия,

появляется возможность определять накопленную степень деформации за весь цикл обработки. Степень деформации сдвига $\Lambda = \int_0^{\tau_k} H d\tau$, H - интенсивность скоростей деформации сдвига; τ и τ_k - текущее и конечное время деформирования, который в трех взаимно перпендикулярных сечениях показан на рис. 5. Сравнительно однородная деформация наблюдается в центральной области заготовки. Снижение Λ в периферийных зонах связано с действием контактного трения и, в большей степени, с подстыванием металла в приконтактных с инструментом зонах. Поэтому теплоизоляция полезна не только с точки зрения выравнивания температуры, но и достижения более однородной деформации в объеме. Частично неоднородность деформированного состояния связана с различием относительных обжатий вдоль трех ортогональных осей, реализуемых в цикле обработки. Но эта неоднородность устраняется трехкратным повторением цикла с последовательным чередованием осей нагружения.

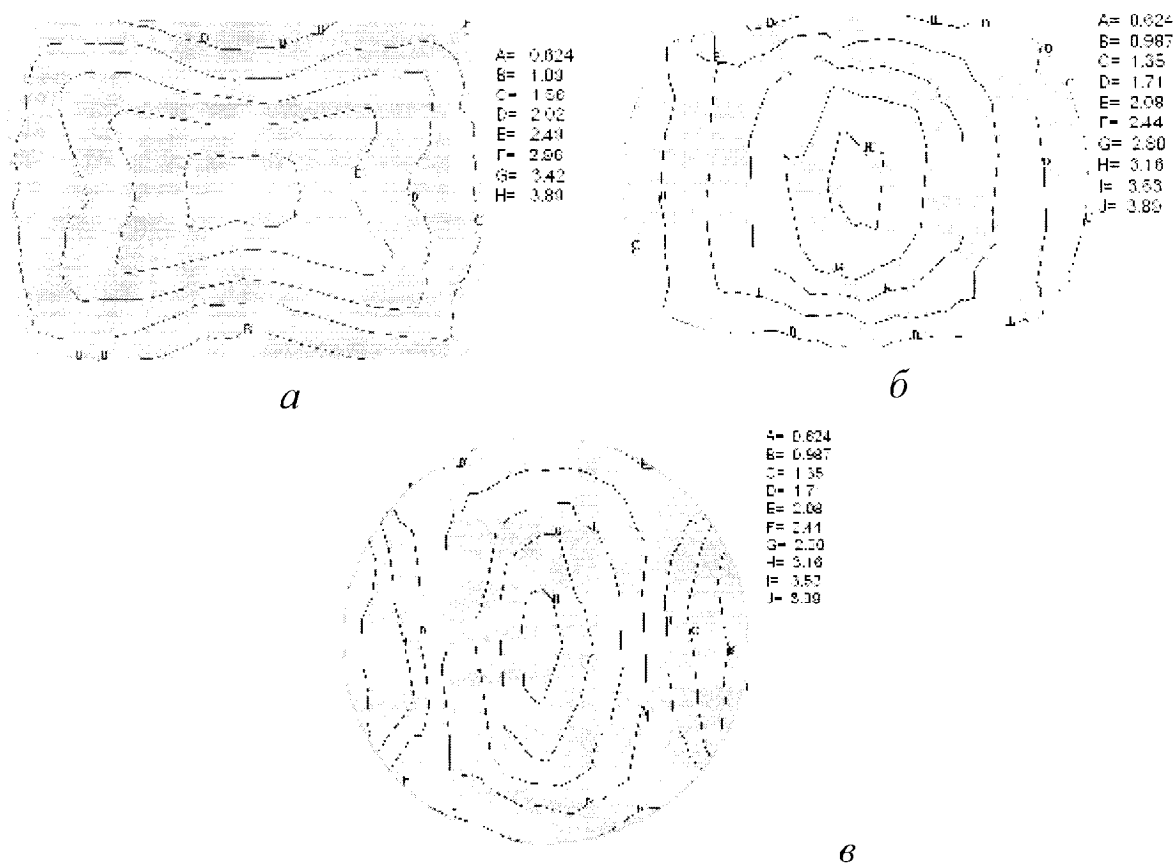


Рис. 5. Распределение накопленной за цикл обработки степени деформации сдвига в сечениях X-Y (а), X-Z (б) и Y-Z (в) деформированной заготовки

Постановка задачи расчета НДС и температуры при трехсторонней ковке дает возможность анализировать деформирование в теплом состоянии, когда из-за отсутствия перекристаллизации накопленная степень деформации и

компоненты главных деформаций позволяют судить о формировании изотропных механических свойств. Кроме того, расчет показателя напряженного состояния σ/T , где σ - среднее нормальное напряжение; T - интенсивность касательных напряжений, при наличии опытных данных о пластичности металла позволяет выбирать температурно-скоростные условияковки без разрушения заготовки. В рамках данного решения определяются энергосиловые параметрыковки и имеется возможность оценивать прочность инструмента, что особенно важно при осуществлении теплой деформации, когда сопротивление деформации существенно повышается. Описанный цикл горячейковки характеризуется необходимыми для обжатия усилиями прессы, изменение которых во времени показано на рис. 6. Если задаются механические и теплофизические характеристики материала бойков, их исходная температура нагрева, то вполне реален расчет полей напряжений и температуры в объеме бойков.

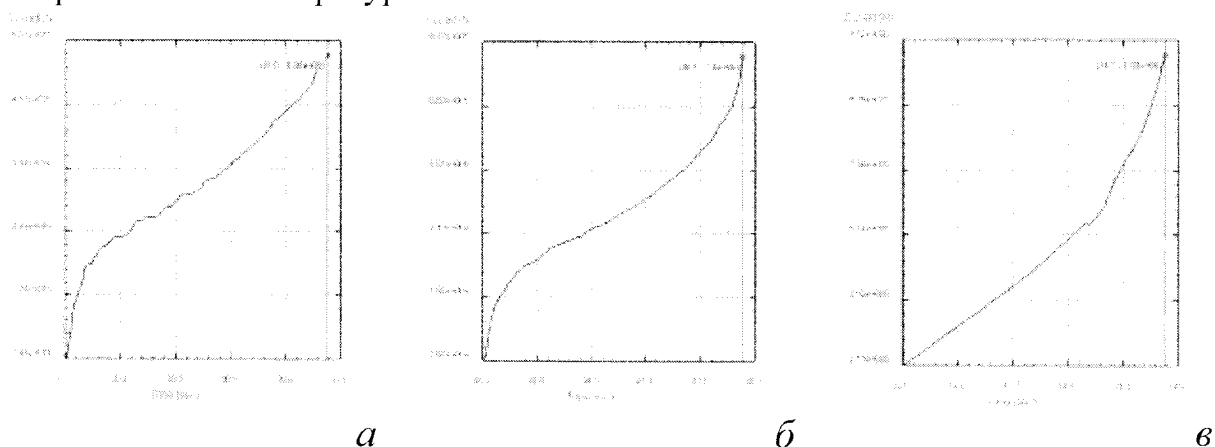


Рис. 6. Усилие осадки на трех этапахковки в зависимости от времени:
а – осесимметричная осадка; *б* – первая осадка в вырезных бойках;
в – вторая осадка в вырезных бойках

Практическое применение результатов решения задачиковки нашло при выборе оборудования и при проектировании инструмента на участке производства молибденовых листов на одном из промышленных предприятий Свердловской области.