

Шаврин О.И., Скворцов А.Н. Конечно-элементное моделирование термомеханических процессов при изготовлении высокопрочной проволоки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 147–165. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.10

Shavrin O.L., Skvortsov A.N. Finite-element modelling of thermal and deformational processes in manufacturing high-strength wire. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No. 1. Pp. 147-165. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.10



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 1, 2016

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2016.1.10

УДК 621.77; 004.942

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

О.И. Шаврин, А.Н. Скворцов

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 11 октября 2015 г.
Принята: 25 января 2016 г.
Опубликована: 30 марта 2016 г.

Ключевые слова:

конечно-элементное моделирование, проволока, термомеханические процессы, индукционный нагрев, пластическая деформация, волочение, обжатие, напряженное состояние

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются вопросы конечно-элементного моделирования термомеханических процессов при изготовлении высокопрочной проволоки. Объектом исследования является технология термомеханической обработки (ТМО). Технологическая модель процесса включает скоростной нагрев проволоки до температур, превышающих температуру A_{c3} , гомогенизирующую выдержку, деформацию заготовки, перемещение деформированной заготовки при контрольно-стабилизированной температуре, обеспечивающей формирование полигонизированной структуры, в зону охлаждения. На базе содержательной функциональной модели проведено конечно-элементное моделирование процессов индукционного нагрева и формообразования проволоки при волочении и обжатии обкаткой в трехроликовой обкатной головке. Тепловое поле при индукционном нагреве по поперечному сечению неоднородно, зависит от диаметра проволоки, скорости перемещения через индуктор, частоты индукционного нагрева. При волочении наблюдается сложное напряженное состояние, процесс осесимметричен, эквивалентные пластические деформации незначительно отличаются от деформации, соответствующей расчетной степени деформации, показано место возможного разрыва после выхода из волюки. При обкатке эквивалентные пластические деформации значительно отличаются от деформации, соответствующей расчетной по обжатию степени деформации из-за тангенциальной составляющей. Результатом использования формообразования в трехроликовой обкатной головке может быть более значительное упрочнение материала, чем предполагалось при разработке технологии исходя из заданной степени деформации (более значительное деформационное упрочнение).

© ПНИПУ

© Шаврин Олег Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: shav-rin@istu.ru
Скворцов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: scv@istu.ru

Oleg I. Shavrin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: shavrin@istu.ru
Andrey N. Skvortsov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: scv@istu.ru

FINITE-ELEMENT MODELLING OF THERMAL AND DEFORMATIONAL PROCESSES IN MANUFACTURING HIGH-STRENGTH WIRE

O.I. Shavrin, A.N. Skvortsov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 11 October 2015
Accepted: 25 January 2016
Published: 30 March 2016

Keywords:

simulation, wire, thermal strain processes, induction heating, plastic strain, wire drawing, wire reduction, state of stress

ABSTRACT

The paper considers simulation of thermal strain processes while high-strength wire manufacturing. Thermal strain processing (TSP) technique was studied. Processes model consisting of wire high-speed heating up to temperatures exceeding A_{c3} , homogenizing soaking, workpiece straining, workpiece transfer to cooling zone under controlled and stabilized temperature providing polygonised structure formation. Simulation of thermal strain induction heating, wire drawing and reduction by running in three-roll running head was performed on the basis of conceptual functional model. Induction heating thermal field is not homogeneous within the section and depends on wire diameter, inductor transfer speed and induction heating frequency. Wire drawing shows complex state of stress, the process is axisymmetric, equivalent plastic strains are slightly different from rated strains; possible tear location on leaving the die is shown. Running equivalent plastic strains are considerably different from the rate one in terms of reduction due to tangential component. Three-roll running head application may result in higher material strengthening than it has been predicted during technique development on the account of pre-assigned degree of strain.

© PNRPU

Введение

Надежность и долговечность изделий машиностроения помимо оптимальности проектирования и прочностных расчетов определяется свойствами применяемых материалов, их конструктивной прочностью, способностью воспринимать эксплуатационные нагрузки без разрушения. Основными материалами для деталей машин, воспринимающих значительные нагрузки, остаются конструкционные стали [1]. Повышение их прочности по-прежнему актуальная задача материаловедов. Традиционные подходы к проблеме – усложнение химического и фазового состава, увеличение дисперсности структуры, наклеп при пластической деформации и другие подходы [2–4] в последние годы дополнились методами повышения эксплуатационных механических характеристик металлов за счет формирования субмикроструктурной (СМК) и наноразмерной (НР) структур. Установлено, что к получению зерен СМК- и НР-уровня приводит сочетание двух факторов. Это высокая интенсивность и немонотонность деформации, осуществляемой при температурах не выше температуры протекания процессов возврата [5]. Эти процессы получили название интенсивной пластической деформации (ИПД) [6–8]. Прочность металлов при ИПД увеличивается, но размеры получаемой заготовки не позволяют их рассматривать как конструкционный материал для изделий машиностроения. Для характеристик сопротивления малым пластическим деформациям [9] и усталостной прочности [10, 11] большое значение имеет не только размер зерен, но и тонкое строение зерна, размер субзерен. При развитой субструктуре субграницы делают значительный вклад в упрочнение, определяемый малоугловыми границами, увеличивающими напряжение течения [12].

Развитая полигональная субструктура в конструкционных сталях формируется при различных видах термомеханической обработки, в том числе высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) [13–14], которую можно осуществить и в условиях металлургического производства упрочненного проката.

Обзор подходов к моделированию ВТМО

При встраивании ВТМО в процесс горячей прокатки добиться оптимальных режимов (температура, степень деформации, продолжительность) с точки зрения максимальной дисперсности полигональной субструктуры невозможно.

Исследования процесса термомеханической обработки (ТМО) деталей машин, осуществляемой на специальном оборудовании, показали, что при определенных режимах обработки можно получить субструктуру, соответствующую признакам наноразмерности [15]. Процесс может быть применен для получения заготовок в виде проволоки, например, для изготовления винтовых пружин.

Одной из принципиальных технологических корректировок процесса является применение скоростного нагрева заготовок под последующую высокотемпературную деформацию. Скоростной нагрев, например индукционный, формирует дисперсную структуру высокотемпературной фазы, в которой при последующих операциях процесса деформации и охлаждении – образуется дисперсная полигональная субструктура [16, 17].

При скоростном нагреве должны решаться противоречивые задачи:

- обеспечение дисперсности высокотемпературной фазы;
- обеспечение гомогенности ее химического состава;
- затрудненность процессов рекристаллизации после деформации.

Если требование дисперсности и затрудненности процессов рекристаллизации требует пониженной температуры скоростного нагрева, то гомогенность химического состава – повышенной температуры или выдержки при температуре нагрева. Для минимизации этих противоречий нагрев и деформация возможны по нескольким вариантам [18].

На рис. 1, 2 представлены характерные температуры материала: M_n – температура начала мартенситного превращения, A_{c1} – температура начала аустенитного превращения, A_{c3} – температура окончания аустенитного превращения. Конкретные значения температур зависят от материала прутка, скоростных параметров процесса нагрева и охлаждения. Значимым параметром процесса охлаждения является отсутствие попадания текущей температуры материала в зону промежуточного превращения (кривые в правой части схем). Схема процесса нагрева и деформации (см. рис. 1, 2) включает скоростной нагрев 1 проволоки до температур, превышающих температуру A_{c3} , гомогенизирующую выдержку 2, деформацию 3 заготовки при этой температуре, перемещение сформированной заготовки при контрольно-стабилизированной температуре 4, обеспечивающей формирование полигональной структуры в зону охлаждения 5.

Нагрев проволоки и выдержка при температуре, гомогенизирующей высокотемпературную фазу, выравнивает температуру по сечению индукционно нагретой проволоки и химический состав по углероду и легирующим элементам.

Недостатком такого варианта является повышенная температура деформации, при которой могут протекать не только процессы полигонизации, но и начальные стадии рекристаллизации.

Для уменьшения опасности рекристаллизации возможен второй вариант процесса. Схема его представлена на рис. 2. В этом варианте процесса используется также скоростной нагрев, гомогенизирующая выдержка 2, но деформация производится после контролируемого подстуживания проволоки 3 на 100–150 °С, но не ниже температуры A_{c3} . Деформированная проволока при перемещении выдерживается при контрольно-стабилизированной температуре 5, обеспечивающей формирование полигональной структуры. Пониженная температура деформации затрудняет рекристаллизационные процессы [19].

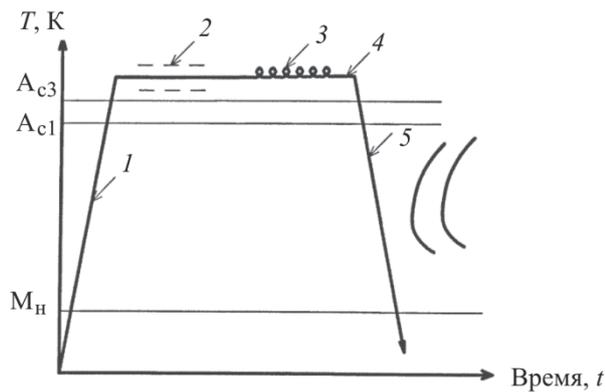


Рис. 1. Схема процесса (вариант 1)

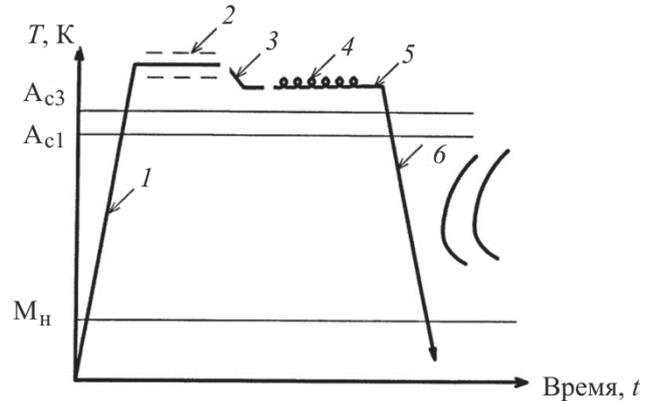


Рис. 2. Схема процесса (вариант 2)

Для обеспечения стабильности и постоянства структуры и фазового состава в объеме индукционно нагреваемой под деформацию проволоки при осуществлении процесса необходимо учитывать особенности формирования теплового поля в поперечном сечении и по длине проволоки. Это может быть достигнуто моделированием нагрева, учитывающего влияние параметров нагревательного оборудования и динамики процесса.

Процесс формообразования при термомеханической обработке проволоки может быть осуществлен по двум вариантам:

- деформация волочением в стационарной волоке;
- деформация обжатием по схеме обкатки.

Исходя из имеющегося опыта, условия обеспечения оптимального теплового состояния материала в момент начала деформирования (температура по поперечному сечению одинакова и достаточна для формирования полигональной субструктуры), скорости деформирования для всех вариантов одного порядка можно значительно упростить задачу моделирования, учитывая только упрочнение изотропного материала от истинных пластических деформаций. Значения истинных пластических деформаций могут значительно отличаться от деформаций, соответствующих расчетной степени деформации, в том числе и по поперечному сечению проволоки. Определить истинные пластические деформации можно проведением математического моделирования процесса формообразования с использованием численных методов.

Проведенное конечно-элементное моделирование позволит также определить напряженное состояние, возникающие усилия и моменты в процессе формообразования, что способствует обоснованному выбору оборудования и технологической оснастки. В случае отсутствия оборудования и технологической оснастки полученные значения усилий и моментов могут быть положены в основу технического задания на проектирование.

В рамках проводимого исследования необходимо определиться с объектом исследования, в том числе выбрать тип математической модели.

Принятая при математическом моделировании формальная классификация моделей основывается на классификации используемых математических средств. Применяются:

- линейные или нелинейные модели;
- сосредоточенные или распределенные системы;
- детерминированные или стохастические;
- статические или динамические;
- дискретные или непрерывные.

Возможны и смешанные типы: в одном отношении сосредоточенные (по части параметров), в другом – распределенные модели и т.д.

Также принято различать модели по способу представления объекта – структурные или функциональные модели.

Структурные модели представляют объект как систему со своим устройством и механизмом функционирования. Функциональные модели не используют таких представлений и отражают только внешне воспринимаемое поведение (функционирование) объекта.

В рамках исследования объектом изучения являются:

– технологии процесса высокотемпературного деформирования с индукционным нагревом проволоки;

– объекты экспериментальных исследований – образцы проволоки.

Математическая модель изучаемого объекта может быть:

– стохастической формальной (связывающей результирующий параметр – наноразмерную структуру с факторными признаками (параметрами изменения технологии));

– функциональной содержательной моделью, полученной с использованием математического моделирования в пакетах твердотельного и конечно-элементного моделирования.

Обычно используется следующая рациональная последовательность применения программных средств. В пакетах твердотельного моделирования разрабатываются модели технологического оборудования, технологической оснастки, объектов исследования. Создаются геометрические математические модели. Разработанные твердотельные модели при передаче в пакеты конечно-элементного моделирования представляются в виде объектов, состоящих из формализованных типовых конечных элементов, имеющих заданные свойства и ограниченный набор степеней свободы. Приложение граничных условий и заданных нагрузок, задание температурозависимых свойств материала позволит провести имитационное моделирование процессов при реализации изучаемых технологий. Особенностью данного математического моделирования является то, что в явном виде полная математическая модель не представляется. При моделировании используются формализованные физические законы, принятые в отношении используемых конечных элементов (например, билинейный закон упрочнения материала в процессе пластического деформирования, гипотеза об изотропном материале), методы решения на основе матричной алгебры и прописанные в программном обеспечении. Свойства материала, граничные условия, приложенные нагрузки возможно прописать в виде функциональных зависимостей (уравнений) или в виде таблиц, которые для нахождения значений параметров аппроксимируются.

Для изучения процесса используется функциональная содержательная модель. Целью является выбор оптимальных технологических параметров и назначение оптимального комплекса регистрируемых характеристик процессов при проведении экспериментальных исследований.

Технологическая модель процесса термомодеформационной обработки деталей машин определяет этапы структурной математической модели изучаемой технологии:

– индукционный нагрев – решаются задачи нестационарных периодических электромагнитных полей и распределения тепловых полей в материале заготовки. Задачи механики не решаются ввиду отсутствия необходимости учета изменения механических свойств;

– преддеформационная выдержка – решаются задачи распределения тепловых полей с учетом гидрогазодинамики и теплообмена с окружающей средой, задачи нестационарных периодических электромагнитных полей. Задачи механики не решаются ввиду их не-

значительного изменения на данном этапе и практического отсутствия влияния на изменение материала заготовки;

– деформирование (волочение, обжатие обкаткой в трехроlikовой обкатной головке) – решаются задачи механики упруго-пластического деформирования с учетом упрочнения материала, задачи теплообмена с инструментом, оснасткой и, при необходимости, с элементами технологического оборудования. На данном этапе основным является поведение материала в очаге деформации для определения возможности стабильного осуществления технологического процесса, предотвращение нарушения целостности материала;

– последеформационная выдержка – основной решаемой задачей является задача тепломассообмена между материалом изучаемого объекта и окружающей средой. Поскольку на данном этапе материал находится под действием высокой температуры и имеет невысокие механические характеристики, актуальна задача механики – изменение геометрических характеристик формируемой детали и возможность нарушения целостности материала;

– охлаждение – основной решаемой задачей является задача тепломассообмена между материалом изучаемого объекта и охлаждающей средой (вода, масло, синтетические растворы. На данном этапе формируется комплекс геометрических характеристик готовой продукции. Основная задача этапа – определить оптимальные свойства охлаждающей среды с последующим выбором используемой при проведении экспериментальных исследований реальной охлаждающей среды с обеспечением необходимой критической скорости в области промежуточного превращения и достаточной при температурах мартенситного превращения.

В соответствии с поставленной задачей к анализу принимаются:

- обработка проволоки (0,5–6 мм) – волочение;
- обработка проволоки (6–16 мм) – обжатие обкаткой в трехроlikовой обкатной головке.

В рамках настоящей статьи будут приведены результаты моделирования первых двух этапов исследуемого процесса. Результаты моделирования следующих этапов будут представлены в последующих материалах.

В соответствии с целью исследования, принимаем:

- материал заготовки – сталь 60С2А, материал изотропный (коэффициент Пуассона – 0,28), закон упрочнения – билинейный;
- материал волоки – ТК4, материал роликов – Р6М5.

В табл. 1 приведены параметры моделируемых процессов для этапа индукционного нагрева, в табл. 2 – параметры процесса для этапа формообразования.

Таблица 1

Параметры процесса индукционного нагрева

№ п/п	Диаметр прутка, мм	Частота, кГц	Конструкция индуктора	Скорость перемещения проволоки, м/мин
1	1,5	440	1	25
2	3	440	1	25
3	5	66	2	20
4	8	66	2	15
5	12	22	2	10
6	16	22	2	8

Параметры процесса формообразования

Вариант	Диаметр до деформации, мм	Диаметр после деформации, мм	Степень деформации, %	Скорость, м/мин
1	1,5	1,4	13	28,25
2	3	2,7	19	29,75
3	5	4,5	20	24
4	8	7,3	23,5	18,5
5	12	11	19	11,9
6	16	14,6	20	9,6

Примечание. Варианты 1–3: деформирование – волочение в цельной твердосплавной волоке, материал волокна ТК4; варианты 4–6: деформирование – обжатие обкаткой в трехроlikовой обкатной головке, скорость вращения головки 1000 об/мин.

Моделирование индукционного нагрева

Моделирование осуществляется в комплексе: ANSYS Maxwell (электромагнитный анализ) и ANSYS Fluent (тепловой анализ). Моделирование индуктора производится в упрощенной форме. В модели были опущены крепежные элементы, а также элементы, которые не являются частью электромагнитной системы. Твердотельная модель процесса для конструкции индуктора 1 представлена на рис. 3, а, для конструкции индуктора 2 – на рис. 3, б.

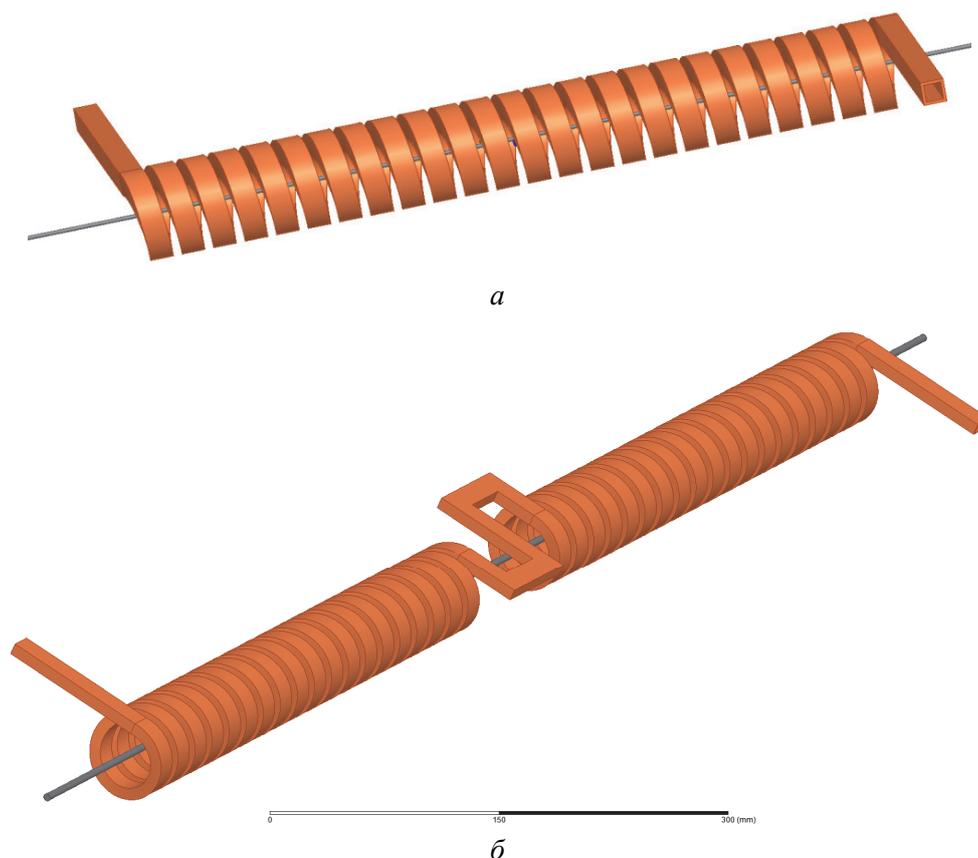


Рис. 3. Твердотельная модель процесса: а – конструкция индуктора 1; б – конструкция индуктора 2

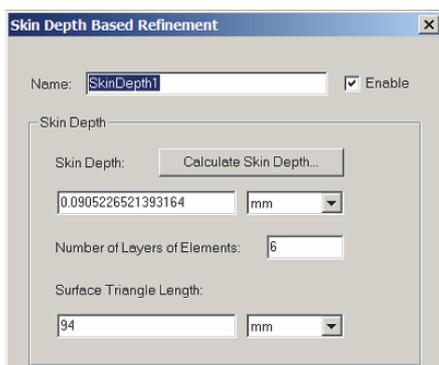
Конечно-элементная модель процесса в Maxwell использует системные конечные элементы, при решении в Fluent используются конечные элементы Hex20 (гексагональные с 20 узлами Solid90), выбор параметров сетки по умолчанию (автоматически).

Глубина скин-слоя приведена с учетом электромагнитных свойств материала проволоки и частоты тока для разных диаметров проволоки приведено в табл. 3. Результаты моделирования индукционного нагрева проволоки диаметром 1,5 мм представлены на рис. 4, 5, 6, 7.

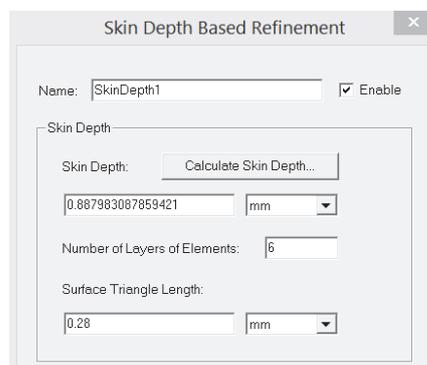
Таблица 3

Глубина скин-слоя при различных температурах и частотах оборудования индукционного нагрева, мм

Температура, °C	Частота индукционного нагрева, кГц		
	440	66	22
	Глубина скин-слоя, мм		
22	0,09	0,23	0,4
1000	0,89	2,29	3,97



а



б

Рис. 4. Калькулятор расчета глубины скин-слоя для частоты 440 кГц с учетом свойств материала при температуре: а – 22 °C; б – 1000 °C

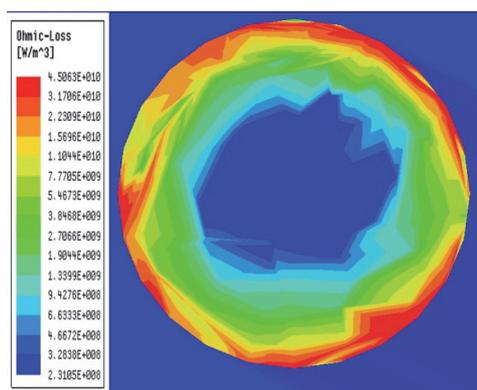


Рис. 5. Омические потери (сечение проволоки в середине индуктора)

Аналогичные результаты были получены для всех остальных вариантов.

Значения температур поверхности и радиального перепада температур (поверхность–ось) при выходе проволоки из индуктора и на расстоянии 100 мм приведены в табл. 4.

Анализ приведенных данных показывает, что температура тонкого поверхностного слоя проволоки $\varnothing 1,5$ мм практически одинакова (колебания в пределах 1°).

Изменение температуры поверхности проволоки и перепад температур у проволоки разных диаметров (табл. 4) объясняются взаимодействием процессов разогрева от индукции и перераспределением тепла в объеме проволоки из-за теплопроводности.

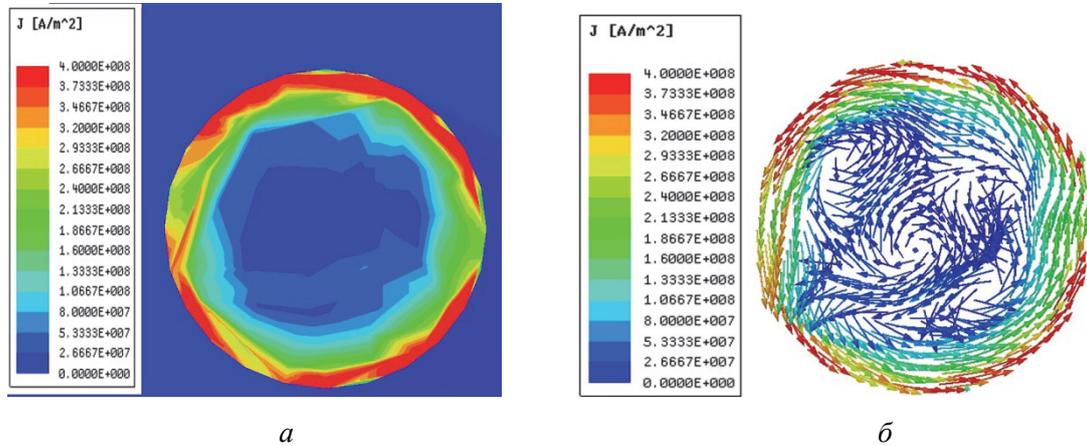


Рис. 6. Плотность тока в проволоке в середине индуктора: *a* – амплитудное значение; *б* – векторное представление движения тока

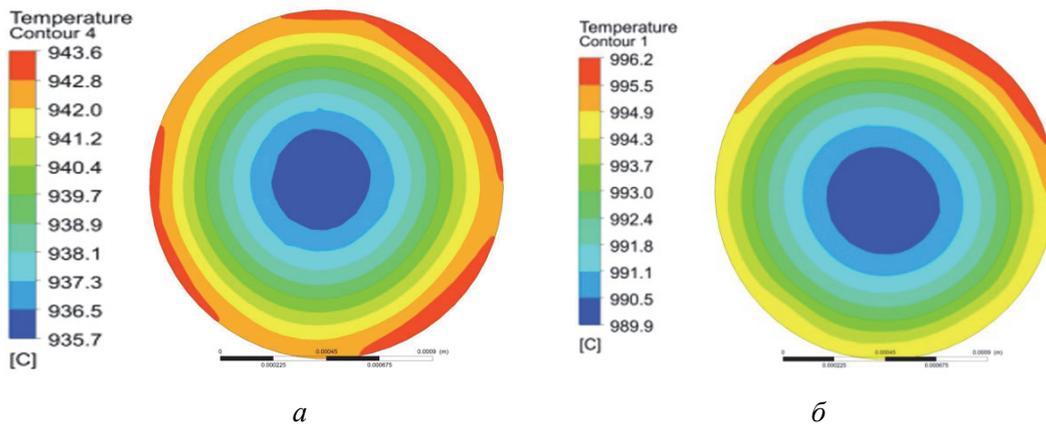


Рис. 7. Распределения температуры, диаметр проволоки 1,5 мм: *a* – в поперечном сечении после выхода из индуктора; *б* – в поперечном сечении на расстоянии 100 мм после выхода из индуктора

У проволоки $\varnothing 1,5$ мм при применяемой частоте тока 440 кГц глубина скин-слоя при температуре 1000°C составляет 0,8 мм (см. табл. 3), что превышает величину радиуса проволоки и уменьшает перепад температур в поперечном сечении (всего $10,5^\circ\text{C}$). Перераспределение температуры в объеме из-за теплопроводности минимально – перепад температуры по сечению уменьшается только на 4°C . Это, по-видимому, приводит к эффекту дополнительного подогрева поверхности магнитным полем при выходе из индуктора.

При увеличении диаметра проволоки до 3 мм, нагреваемой при той же частоте 440 кГц, глубина скин-слоя составляет немногим более половины радиуса. Как результат перепад температуры (поверхность–ось) при выходе из индуктора увеличивается более чем в 5 раз (до 55°C). Через 100 мм из-за теплопроводности перепад температур уменьшается до $14,2^\circ\text{C}$ при незначительном (на 9°C) увеличении температуры поверхности.

Нагрев проволоки больших диаметров при других частотах тока (см. табл. 1) при уменьшении соотношения глубин скин-слоя и радиуса проволоки увеличивает перепад температур (поверхность – ось) при выходе из индуктора и показывает роль теплопроводности – перепад температур через 100 мм после выхода из индуктора уменьшается до 3 раз.

Использование при моделировании пространственного представления (3-D) индуктора позволило выделить влияние формы индуктора на распределение магнитных полей (см. рис. 6) и связанного с этим мгновенного выделения тепла по телу проволоки (см. рис. 7). Из-за винтовой формы индуктора распределение магнитного поля относительно поперечного сечения проволоки несимметрично и как следствие мгновенное тепловыделение ассиметрично. После прохождения проволокой всего индуктора распределение температуры практически осесимметрично.

Таблица 4

Значения перепада температуры

№ п/п	Диаметр проволоки, D , мм	Температура поверхности на выходе из индуктора, °С	Перепад температур на выходе из индуктора, °С	Температура поверхности через 100 мм после выхода из индуктора, °С	Перепад температур через 100 мм после выхода из индуктора, °С
1	1,5	942	10,5	995	6,3
2	3	989	55	998	14,2
3	5	992	50	998	14,5
4	8	997	159,2	988	57,6
5	12	995	181,2	998	61,8
6	16	1040	251,2	1000	110,4

Примечание. Полученные результаты позволяют принять допущение, что в момент начала формообразования температура материала 1000 °С.

Следующий этап процесса – деформирование.

На рис. 8 представлен внешний вид узла деформации волочением, выполненный в КОМПАС-3D.

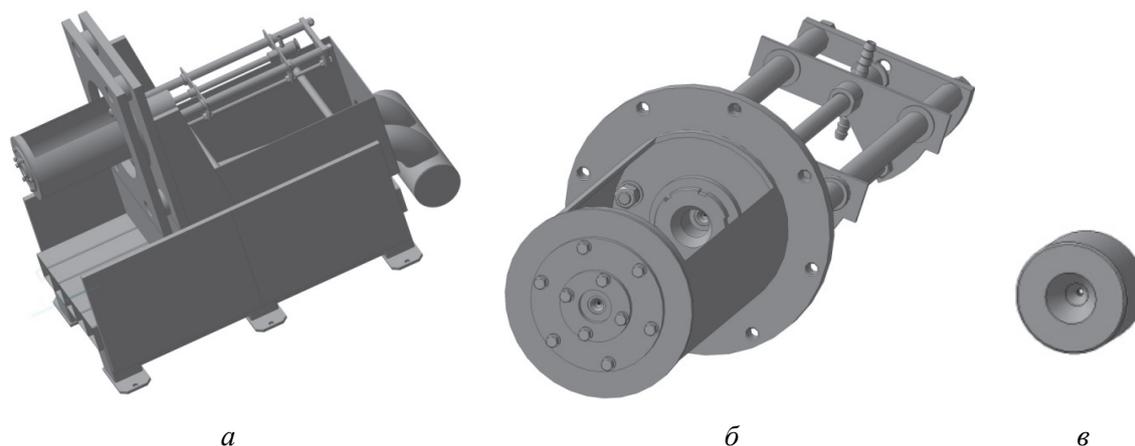


Рис. 8. Внешний вид элементов узла деформации волочением для исследования технологии волочения проволоки, выполненных в КОМПАС-3D: *а* – узел деформации волочением; *б* – мыльница в сборе; *в* – волока $\varnothing 1,5$ мм

На рис. 9 представлен внешний вид устройства для деформирования проволоки в трехроликовой обкатной головке.

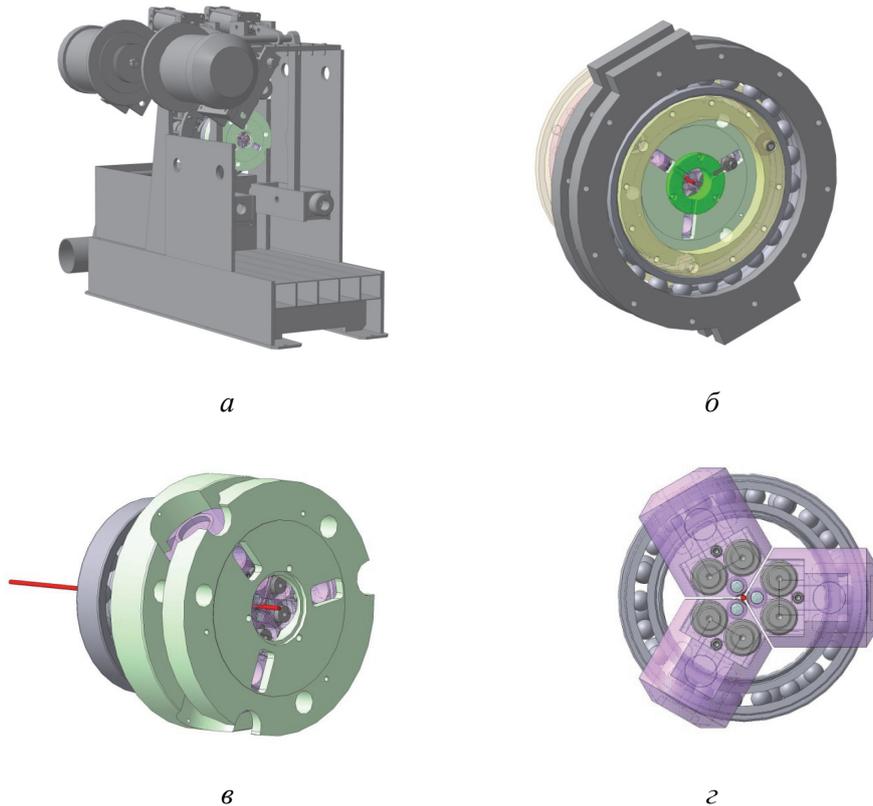


Рис. 9. Внешний вид элементов устройства для деформирования проволоки в трехроликовой обкатной головке, выполненных в КОМПАС-3D: *а* – устройство для деформирования; *б* – *с* – детализация трехроликовой обкатной головки (в центральной части красным цветом обозначена обрабатываемая проволока)

Вышеприведенные геометрические модели являются основой для конечно-элементного моделирования термомодеформационных процессов.

Моделирование осуществлялось в программном комплексе ANSYS v. 15.07 (номер пользователя 607281).

При моделировании используются температурозависимые электрофизические и физико-механические характеристики материала – сталь 60С2А, окно свойств в библиотеке материалов с учетом упрочнения по билинейной зависимости показано на рис. 10.

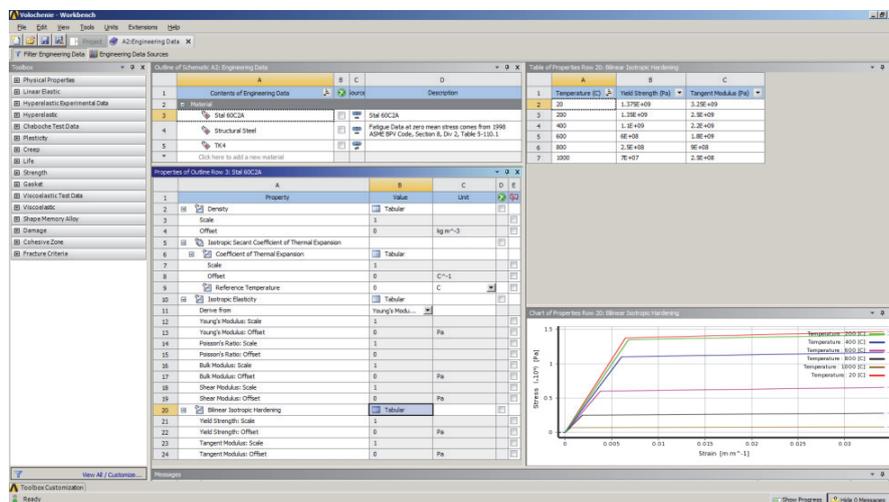


Рис. 10. Окно свойств материала сталь 60С2А в библиотеке материалов

Волочение проволоки

Конечно-элементная модель процесса волочения проволоки $\varnothing 1,5/\varnothing 1,4$ мм представлена на рис. 11. (модель рассечена фронтальной плоскостью). Конечно-элементная модель процесса использует конечные элементы Hex20 (гексагональные с 20 узлами Solid186), в необходимых случаях производилось упрощение до Wed15 (призматические с 15 узлами Solid186), Tet10 (тетрагональные с 10 узлами Solid186/Solid187). Выбор параметров сетки по умолчанию (автоматически).

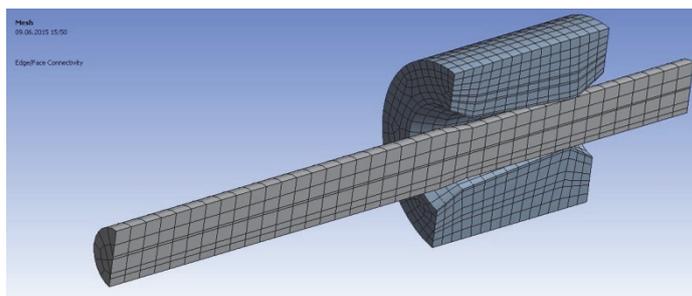


Рис. 11. Конечно-элементная модель процесса волочения проволоки 1,5/1,4 мм

В табл. 5 приведены осредненные результаты моделирования процесса волочения для установившегося процесса:

- эквивалентные упругие деформации, $\epsilon_{упр}$;
- эквивалентные пластические деформации, $\epsilon_{пл}$;
- эквивалентные напряжения по Мизесу, $\sigma_{экр}$;
- осевая сила протягивания, F .

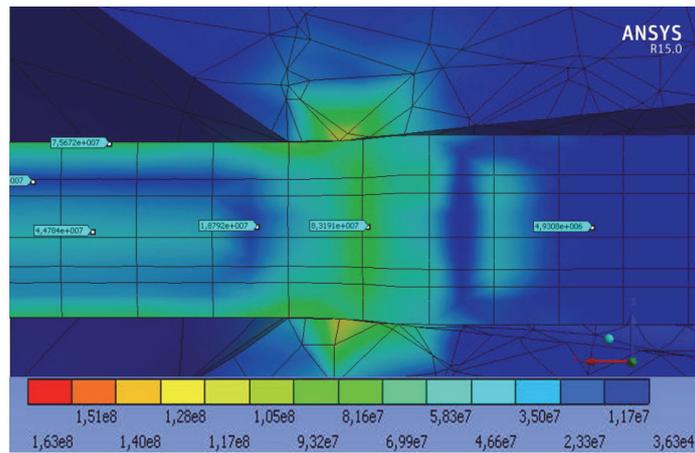
Таблица 5

Результаты моделирования процесса волочения через монолитную волоку

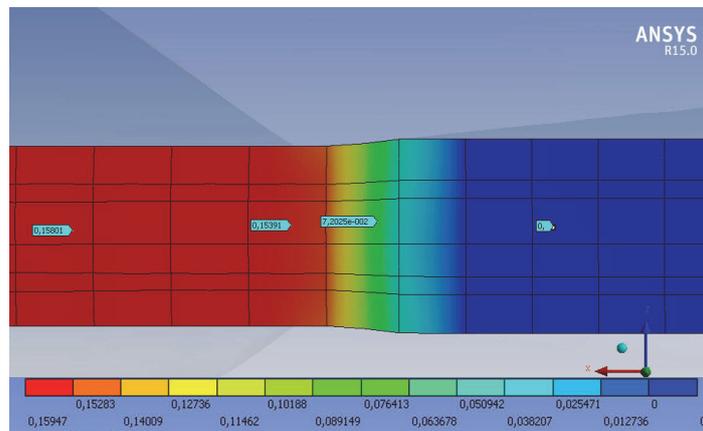
Диаметр после деформации, мм	$\epsilon_{упр}$, м/м	$\epsilon_{пл}$, м/м	$\sigma_{экр}$, МПа	F , Н
1,4	9,4e-4	0,158	83,2	30
2,7	1,12e-3	0,226	114	132
4,5	1,14e-3	0,232	76	560

На рис. 12. приведена иллюстрация объемного напряженного состояния для проволоки в установившемся процессе волочения 1,5/1,4 мм.

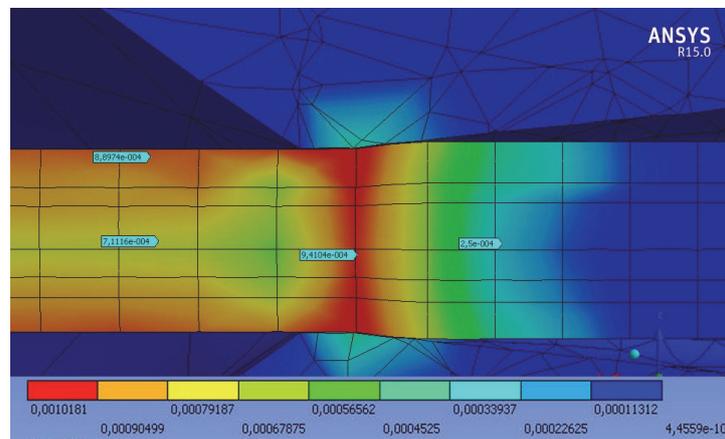
Приведенные результаты моделирования показывают сложное напряженное состояние в процессе волочения, значения максимальных пластических деформаций (см. табл. 5) (истинные деформации) незначительно отличаются от деформаций, соответствующих расчетной степени деформации (инженерные деформации) (см. табл. 2). Процесс деформирования осесимметричен, тангенциальные деформации незначительны, что подтверждается незначительным изменением сетки конечных элементов в зоне после волоки. Распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) показывает возможное место обрыва после выхода из волоки, подтверждая необходимость использования технологической смазки в процессе волочения. Одним из вариантов снижения трения в волоке может быть использование гидродинамического давления в слое смазки [20].



а



б



в

Рис. 12. Процесс волочения проволоки 1,5/1,4 мм: а – эквивалентные напряжения по Мизесу (Па); б – эквивалентные пластические деформации (м/м); в – эквивалентные упругие деформации (м/м)

В случае волочения без использования смазки (коэффициент трения 0,05) наблюдается значительное изменение напряженного состояния и рост усилия волочения [21]. Максимальные эквивалентные напряжения 112,8 МПа, пластические деформации 0,162,

упругие деформации $1,13 \cdot 10^{-3}$, осевое усилие 40,8 Н (увеличение на 10,8 Н с учетом трения в волоке).

В случае волочения без использования смазки (коэффициент трения 0,15) наблюдается дальнейшее увеличение напряженного состояния и рост усилия волочения [21]. Максимальные эквивалентные напряжения 109,6 МПа, пластические деформации 0,173, упругие деформации $1,13 \cdot 10^{-3}$, осевое усилие 65 Н (увеличение на 25 Н с учетом трения в волоке).

Обжатие обкаткой в трехроликовой обкатной головке

Процесс обжатия в трехроликовой обкатной головке характеризуется сложной траекторией движения очага деформации относительно оси проволоки, которая может быть разложена на две составляющие:

- поступательное движение проволоки;
- вращательное движение головки вокруг оси проволоки (обкатные неприводные ролики головки обжимают и обкатывают наружную поверхность заготовки).

Сопротивление качения неприводных роликов по поверхности заготовки незначительно по сравнению с сопротивлением сухого волочения. Коэффициент трения при моделировании в первом приближении можно не учитывать.

Твердотельная модель процесса, созданная в ПО КОМПАС-3D и импортированная в DisignModeler для проволоки 16/14,6 мм представлена на рис. 13. Конечно-элементная модель процесса использует конечные элементы Hex20 (гексагональные с 20 узлами Solid186), в необходимых случаях производилось упрощение до Wed15 (призматические с 15 узлами Solid186), Tet10 (тетрагональные с 10 узлами Solid186/Solid187). Выбор параметров сетки по умолчанию (автоматически).

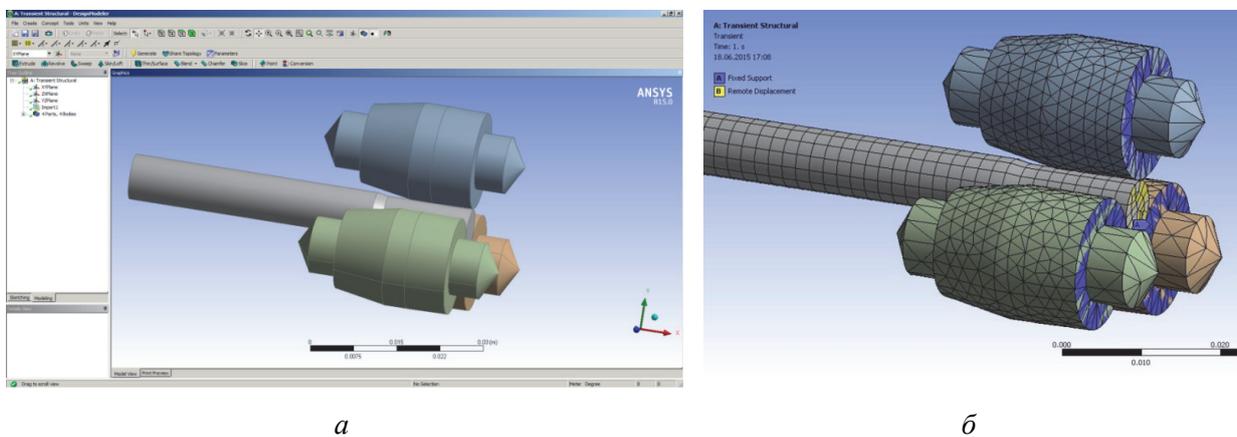


Рис. 13. Геометрическая твердотельная и конечно-элементная модели процесса:
a – твердотельная; *б* – конечно-элементная

Для проведения моделирования используется:

- неподвижное закрепление роликов по торцевой поверхности;
- приложение удаленной нагрузки (продольное перемещение и вращение), приложенной к торцу деформированной проволоки.

В табл. 6 приведены результаты моделирования обжатия обкаткой проволоки в трехроликовой обкатной головке.

Таблица 6

Результаты моделирования процесса обкатки обкаткой в трехроликовой обкатной головке

Диаметр после деформации, мм	$\varepsilon_{упр}$, м/м	$\varepsilon_{пл}$, м/м	$\sigma_{экв}$, МПа	F , Н	M , Н·м
7,3	2,6e-3	0,394	332	1263	3,56
11	4e-3	0,367	406	2435	6,44
14,6	2,4e-3	0,28	230	8,7	

На рис. 14 показано напряженное состояние проволоки в процессе обкатки. Сетка конечных элементов показывает, что направление течения материала в зоне деформации сложное: имеется закручивание материала в направлении вращения головки и осевое вытягивание, в зоне обжатия – на конусе деформирующих роликов – течение материала в обратную сторону. Можно отметить формирование перед очагом деформации наплыва, показывающего, что в процессе формообразования материал испытывает сложное напряженное состояние.

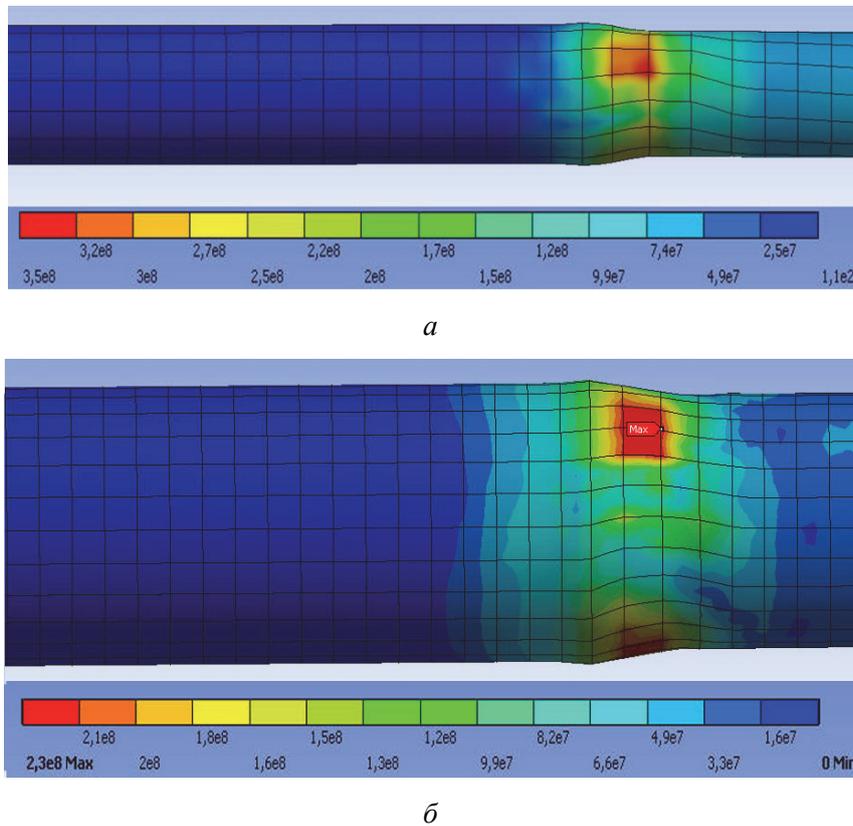


Рис. 14. Напряженное состояние проволоки в процессе обкатки (Па):
 а – диаметр 7,3 мм; б – диаметр 14,6 мм

Приведенные результаты моделирования показывают сложное напряженное состояние в процессе обкатки, значения максимальных пластических деформаций (истинные деформации) (см. табл. 6) значительно отличаются от деформации, соответствующей расчетной по обжатию степени деформации (инженерные деформации) (см. табл. 3). Присутствует значительное влияние тангенциальной составляющей деформации (деформация кручения).

Результатом использования формообразования в трехроlikовой обкатной головке может быть более значительное упрочнение материала, чем предполагается при разработке технологии исходя из заданной степени деформации (более значительное деформационное упрочнение). При металлографических исследованиях наблюдается закручивание волокон в тангенциальном направлении, что в случае совпадения с направлением тангенциальных напряжений при эксплуатации позволит повысить конструкционную прочность детали. Объектами такой реализации могут быть упругие элементы – торсионы, работающие на скручивание в одном направлении.

Анализ результатов моделирования для всех рассмотренных вариантов позволяет сделать заключение о приемлемой сходимости (качественная оценка) и соответствии физическим моделям реального процесса на основе имеющегося опыта. После проведения натурных экспериментов по индукционному нагреву и термомодеформационному формообразованию проволоки по рассмотренным вариантам можно будет сделать количественную оценку сходимости.

Заключение

В статье приведено описание инновационной термомодеформационной обработки проволоки по вариантам:

- обработка проволоки (0,5–6 мм) – волочение в волоке;
- обработка проволоки (6–16 мм) – обжатие обкаткой в трехроlikовой обкатной головке.

Приведена технологическая модель процесса и для двух этапов (индукционный нагрев, формообразование) разработана структурная функциональная модель. В основе модели – использование программного обеспечения твердотельного моделирования КОМПАС 3D и конечно-элементного анализа ANSYS. При конечно-элементном анализе используются температурозависимые электрофизические и физико-механические характеристики материала – сталь 60С2А.

Проведенное математическое моделирование индукционного нагрева проволоки показало, что тепловое поле по поперечному сечению неоднородно, зависит от диаметра проволоки, скорости перемещения через индуктор, частоты индукционного нагрева. При заданных параметрах процесса индукционного нагрева на расстоянии 100 мм после выхода из индуктора градиент температур от наружной поверхности до оси проволоки снижается до допустимых величин (диаметр 16 мм с 251 °С до 110 °С), что позволяет принять допущение в момент начала формообразования температура проволоки – 1000 °С.

При волочении наблюдается сложное напряженное состояние, процесс осесимметричен, эквивалентные пластические деформации незначительно отличаются от деформации, соответствующей расчетной по обжатию деформации, соответствующей расчетной по обжатию степени деформации, показано место возможного разрыва после выхода из волоки. Показано изменение параметров процесса (осевое усилие, напряженное состояние) при учете трения в волоке, что приводит к необходимости использования при волочении технологической смазки.

При обжатию обкаткой в трехроlikовой обкатной головке эквивалентные пластические деформации (истинные деформации) значительно отличаются от степени деформации (инженерные деформации) из-за тангенциальной составляющей. Перед деформи-

рующими роликами образуется наплыв металла заготовки, который увеличивает усилия формобразования. Результатом использования формобразования в трехроликовой обкатной головке может быть более значительное упрочнение материала, чем предполагается при разработке технологии исходя из заданной степени деформации (более значительное деформационное упрочнение).

Исследования выполняются в ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0011.

Библиографический список

1. Фролов К.В. Проблемы надежности и ресурса изделий машиностроения / Проблемы надежности и ресурса в машиностроении. – М.: Наука, 1988. – С. 5–35.
2. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1987. – 208 с.
3. Жадан В.Т., Бернштейн М.Л., Вицарский М.С. Экспериментальная проверка рабочей модели процесса прокатки с применением высокотемпературной термомеханической обработки // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1975. – № 5. – С. 120–123.
4. Битков В.В. Технология и машины для производства проволоки. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. – 346 с.
5. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. – 2006. – № 1. – С. 71–81.
6. Бриджмен П.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М: ИЛ, 1955. – 444 с.
7. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
8. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. – М.: Наука, 2002.
9. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1982. – 400 с.
10. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
11. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2002. – 248 с.
12. Инглиш А.Т., Бакофен У.А. Влияние обработки металлов на разрушение – М.: Металлургия, 1976.
13. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
14. Шаврин О.И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 176 с.
15. Шаврин О.И. Формирование наноразмерной субструктуры в материале деталей машин // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 4–6.
16. Шаврин О.И. Опыт применения индукционного нагрева в технологиях высокотемпературной термомеханической обработки // Индукционный нагрев. – 2010. – № 14. – С. 31–35.
17. Кидин И.Н. Термическая обработка стали при индукционном нагреве. – М.: Металлургия, 1950. – 317 с.
18. Пат. RU 2411101 С2, В21F 35/00 Способ изготовления пружин из стали (варианты) / О.И. Шаврин.

19. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – 3-е изд. – М.: Изд-во Моск. ин-та стали и сплавов, 2005. – 432 с.
20. Битков В.В. Технология и машины для производства проволоки. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. – 346 с.
21. Горловский М.Б., Меркачев В.Н. Справочник волочильщика проволоки. – М.: Metallurgiya, 1993. – 336 с.

References

1. Frolov K.V. Problemy nadezhnosti i resursa izdelii mashinostroeniia [Problems of reliability and service life of mechanical engineering products]. *Problemy nadezhnosti i resursa v mashinostroenii*. Moscow: Nauka, 1988, pp. 5-35.
2. Bobylev A.V. Mekhanicheskie i tekhnologicheskie svoistva metallov [Mechanical and technological properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1987. 208 p.
3. Zhadan V.T., Bernshtein M. L., Vitsarskii M.S. Eksperimental'naia proverka rabochei modeli protsessa prokatki s primeneniem vysokotemperaturnoi termomekhanicheskoi obrabotki [Experimental verification of a working model of the rolling process with the use of high-temperature thermomechanical treatment]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiya*, 1975, no. 5, pp. 120-123.
4. Bitkov V.V. Tekhnologiya i mashiny dlia proizvodstva provoloki [Technology and machinery for the production of wire]. Ekaterinburg: Uralskoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2004. 346 p.
5. Liakishev N.P., Alymov M.I. Nanomaterialy konstruksionnogo naznacheniiia [Nanomaterials for constructional purposes]. *Rossiiskie nanotekhnologii*, 2006, no. 1, pp. 71-81.
6. Bridzhmen P.V. Issledovanie bol'shikh plasticheskikh deformatsii i razryva [The study of large plastic deformation and fracture]. Moscow: Inostrannaia literatura, 1955. 444 p.
7. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei [Nanostructured materials produced by severe plastic deformation]. Moscow: Logos, 2000. 272 p.
8. Kaibyshev O.A., Utiashev F.Z. Sverkhplastichnost', izmel'chenie struktury i obrabotka trudnodeformiruemykh spлавov [Superplasticity, structure refinement and processing of hard-alloy]. Moscow: Nauka, 2002.
9. Rakhshadt A.G. Pruzhinnye stali i splavy [Spring steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 400 p.
10. Ivanova V.S., Terent'ev V.F. Priroda ustalosti metallov [The nature of metal fatigue]. Moscow: Metallurgiya, 1975. 456 p.
11. Terent'ev V.F. Ustalostnaia prochnost' metallov i spлавov [The fatigue strength of metals and alloys]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2002. 248 p.
12. English A.T., Bakofen U.A. Vliianie obrabotki metallov na razrushenie [The effect of treatment on metal destruction]. Moscow: Metallurgiya, 1976.
13. Bernshtein M.L., Zaimovskii V.A., Kaputkina L.M. Termomekhanicheskaia obrabotka stali [Thermomechanical processing of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 480 p.
14. Shavrin O.I. Tekhnologiya i oborudovanie termomekhanicheskoi obrabotki detalei mashin [Technology and equipment of thermomechanical processing machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 176 p.
15. Shavrin O.I. Formirovanie nanorazmernoii substrukturny v materiale detalei mashin [Formation of nanoscale substructures in the material parts of machines]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 4-6.
16. Shavrin O.I. Opyt primeneniia induktsionnogo nagreva v tekhnologiiakh vysokotemperaturnoi termomekhanicheskoi obrabotki [Experience of using induction heating technology in high-temperature thermomechanical treatment]. *Induktsionnyi nagrev*, 2010, no. 14, pp. 31-35.
17. Kidin I.N. Termicheskaja obrabotka stali pri induktsionnom nagreve [Heat treatment of steel in induction heating]. Moscow: Metallurgizdat, 1950. 317 p.

18. Shavrin O.I. Sposob izgotovleniia pruzhin iz stali (varianty). *Patent RU 2411101 C2, V21F 35/00*
19. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. Rekrystallizatsiia metallov i splavov [Recrystallization of metals and alloys]. Moskovskii institut stali i splavov, 2005. 432 p.
20. Bitkov V.V. Tekhnologiya i mashiny dlia proizvodstva provoloki [Technology and machinery for the production of wire]. Ekaterinburg: Uralskoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2004. 346 p.
21. Gorlovskii M.B., Merkachev V.N. Spravochnik volochil'shchika provoloki [Directory wire-drawer wire]. Moscow: Metallurgiya, 1993. 336 p.