

УДК 621.774

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКИ НА СТАНЕ СРВП-130

© 2013 г. П.Л. Алексеев, Е.А. Харитонов, И.З. Вольшонок, Н.Ю. Беляева

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Радиально-сдвиговая прокатка (РСП) играет большую роль в производстве титановых сплавов в ОАО «ВСМПО-АВИСМА» (г. В. Салда), имея ряд преимуществ перед другими процессами обработки металлов давлением. В настоящем исследовании на базе инженерных методик расчета разработан комплекс программных средств для моделирования формоизменения и теплопередачи в объеме металла и с его помощью изучена прокатка прутка диаметром 155 мм из сплава ВТ-6. Разработана программа «ThermoRSR», позволяющая визуализировать расчетные данные в среде «Mathcad», проведено моделирование процесса прокатки с помощью пакета DEFORM-3D и показаны условия его применимости. Рассмотрены перспективные способы измерения температуры проката и крутящего момента на шпинделе прокатного стана.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, поперечно-винтовая прокатка, радиально-сдвиговая прокатка, тепловизор, титановые сплавы.

Radial-shear rolling is prominent in production of titanium alloys at «VSMPO-AVISMA» Open Society (V. Salda city) and has a number of advantages over other plastic metal working processes. In the present investigation on the basis of engineering design procedures, a complex of software has been developed for forming simulation and heat transfer in the metal volume, and with its help the rolling of VT-6 alloy bar of 155 mm in diameter has been studied. «ThermoRSR» program has been developed that allows us to visualize design data in «Mathcad» medium; rolling process simulation has been carried out by means of DEFORM-3D package; and the conditions of its application are shown. Prospective ways of rolled stock temperature and rolling torque measurement are considered.

**Key words:** finite element method, helical rolling, radial-shear rolling, IR imager, titanium alloys.

Радиально-сдвиговой прокатке (РСП) придается важное значение в производстве титановых сплавов в ОАО «ВСМПО-АВИСМА» (г. В. Салда), так как она имеет ряд преимуществ перед другими процессами обработки металлов давлением (ОМД). В то же время относительная сложность изучения параметров процесса РСП и сильная зависимость качества продукции от режимов деформации требуют дальнейшего развития научной базы. Существенным критерием качества металла является соответствие его структуры заданным характеристикам, например равномерности по сечению. Энергоэффективность и ресурсосбережение при производстве также имеют большое значение в настоящее время.

### ТРАДИЦИОННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

Для исследования теплового состояния была выбрана заготовка диаметром 155 мм из титанового сплава ВТ6, прокатываемая в стане РСП за 8 проходов по маршруту 155—150—146—141—136—130—122—112—105 мм по грибовидной (заготовка подается со стороны привода) и чашевидной (подача с противоположной стороны) схемам. Температура нагрева составила соответственно 950 °С.

При прокатке по грибовидной схеме разогрев металла по сечению слитка происходит более равномерно. При дальнейшей прокатке наблюдается отсутствие разогретой центральной области в прутке,

**Алексеев П.Л.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и оборудования трубного производства НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (495) 638-46-79. E-mail: wizard3@mail.ru.

**Харитонов Е.А.** – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. Тел.: (495) 638-46-79. E-mail: nx-omd@mail.ru.

**Вольшонок И.З.** – докт. техн. наук, директор Электростальского политехнического института НИТУ «МИСиС», профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и экологии (144000, Московская обл., г. Электросталь, ул. Первомайская, 7). Тел.: (496) 574-40-42. E-mail: info@elpol.ru.

**Беляева Н.Ю.** – инженер центральной лаборатории автоматики и механизации ОАО «Металлургический завод «Электросталь» (144002, Московская обл., г. Электросталь, ул. Железнодорожная, 1). E-mail: belyaenatasha@mail.ru.

прокатываемом по чашевидной схеме, что, в свою очередь, свидетельствует о более равномерном распределении температуры по сечению заготовки при грибовидной схеме прокатки. Тепловое поле по сечению заготовки постепенно выравнивается, и различий между схемами прокатки не наблюдается.

В процессе расчета параметров теплового поля при прокатке титановых прутков на стане радиально-сдвиговой прокатки СРВП-130 возникла необходимость наглядного представления получаемых данных в удобной для понимания процесса форме. В связи с этим была разработана программа «ThermoRSR», представляющая расчетные данные таким образом, чтобы их можно было визуализировать в среде «Mathcad».

**Параметры прокатки прутка по чашевидной и грибовидной схемам**

№ прохода	Диаметр заготовки, мм	Время прокатки, с	Осевая скорость металла, мм/с	Объем металла, м <sup>3</sup> /с	Мощность, кВт	Разогрев, °С
Чашевидная схема						
1	150	28	232	0,004	251	15
2	146	30	272	0,005	191	11
3	141	31	230	0,004	219	15
4	136	26	232	0,003	251	19
5	130	26	233	0,003	266	22
6	122	24	213	0,005	369	37
7	112	38	187	0,002	337	46
8	105	50	113	0,001	176	46
Грибовидная схема						
1	150	29	198	0,003	151	11
2	146	26	251	0,004	231	14
3	141	23	203	0,003	228	18
4	136	25	204	0,003	234	20
5	130	24	205	0,003	219	20
6	122	31	157	0,002	314	43
7	112	32	157	0,002	331	54
8	105	38	90	0,001	182	59



**Рис. 1.** Распределение температуры металла при температуре нагрева 930 °С

Данная программа описана в среде программирования DELPHI и представляет собой совокупность математических (расчетных) и программных модулей, жестко закрепленных по средствам программирования в единый цикл операций. Данные операции направлены на расчет температурных полей по сечению заготовки в процессе прокатки.

В программе учтены следующие факторы, влияющие на распределение температуры в объеме металла:

- маршрут прокатки;
- время прокатки;
- характеристики материала заготовки;
- параметры теплообмена с окружающей средой.

Учет схемы осуществлялся с помощью указания соответствующего времени начала прокатки в каждом проходе. Данные по времени прокатки при различных схемах прокатки были взяты из непосредственных наблюдений процесса.

Для проверки возможности снижения температуры нагрева было проведено моделирование теплового поля металла при температурах нагрева 950 и 930 °С. Результаты показаны на рис. 1. Отмечается наличие тепловых волн, распространяющихся к центру заготовки, вызванных периодическим нагревом приповерхностной зоны. Разница в максимальной температуре составляет 6 °С, что намного меньше первоначальной 20 °С. Это обусловлено нивелированием различий в температуре нагрева более интенсивным разогревом и меньшей теплоотдачей при пониженной температуре. Таким образом, снижение температуры нагрева не вызовет нежелательных последствий для теплового состояния металла.

Исследование влияния схемы прокатки на энергосиловые и температурные параметры доказало преимущество грибовидной схемы прокатки; установлено,

что калибровка с двумя калибрующими участками обеспечивает более низкие энергосиловые показатели процесса: величина разогрева в этом случае почти вдвое ниже, чем при калибровке с одним калибрующим участком. Выявлено, что применение проектных калибровок снижает разогрев металла в среднем на 20 °С. При прокатке по грибовидной схеме разогрев металла по сечению слитка происходит более равномерно, отсутствуют резкие скачки температуры по сечению, чего нельзя сказать о прокатке по чашевидной схеме. К моменту окончания прокатки поверхностный слой прутка, катаемого по чашевидной схеме, значительно глубже остывает и распределение температуры по сечению заготовки менее равномерно, чем при прокатке по грибовидной схеме. Представленные в таблице данные по тепловым полям для этих схем показывают, что в случае грибовидной схемы распределение температуры по сечению заготовки является более равномерным, наблюдается меньший перепад температуры по объему металла и глубина поверхностного охлажденного слоя меньше, что благоприятно сказывается на структуре и механических свойствах прутка.

Возможность снижения температуры особенно эффективна при использовании в технологическом процессе печей с электрическим нагревом. Снижение температуры нагрева допускает уменьшение минимального времени нагрева с 2,33 до 2,17 ч. Расчет длительности нагрева может быть проведен также с помощью программы «ThermoRSR». При мощности печи для нагрева титановых заготовок 230 кВт расход электроэнергии снижается с 248 до 237 кВт·ч/т, что составляет 4,5 %. Уменьшение времени нагрева с максимального, по данным ОАО «ВСМПО-АВИСМА», 4,5 ч до расчетного 2,17 ч даст экономию электроэнергии 241 кВт·ч/т. Однако вследствие особенностей технологического процесса, по заводским данным, эта величина составляет 70 кВт·ч/т.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ ПАКЕТОВ

В современных условиях следует отметить некоторую ограниченность инженерных методик расчета, которая может быть преодолена применением конечно-элементных пакетов — таких, как QForm, DEFORM, ANSYS/LS-DYNA, и использованием всех ранее полученных результатов для верификации создаваемых моделей. На сегодняшний день су-

ществует большой выбор программных комплексов для моделирования процессов обработки металлов давлением. Многие из них предлагают не только 3D-моделирование процесса, но и построение модели распределения тепла в объеме заготовки. Однако большинство таких программ некорректно задают тепловую задачу для процесса радиально-сдвиговой прокатки, пренебрегая рядом особенностей процесса, или в своих возможностях вовсе упускают из виду задачу моделирования процесса РСП.

В работе [1] показано моделирование процесса РСП в среде ANSYS/LS-DYNA. Как следует из описания предложенного программного модуля, встроенные функции позволяют эффективно реализовать в конечно-элементной модели взаимодействие лагранжевых и эйлеровых сеток. Авторами выполнено в среде ANSYS/LS-DYNA трехмерное конечно-элементное моделирование прокатки сплошной заготовки на основе эйлерова описания поведения сплошной среды. В результате моделирования были определены поля напряжений и деформаций в прокатываемой заготовке, а также энергосиловые параметры прокатки. Установлено, что при решении задачи как в лагранжевой, так и в эйлеровой постановках расчетные величины энергосиловых параметров РСП хорошо коррелируются с практическими результатами. Однако в этой работе было проведено моделирование материала в холодном состоянии, поэтому нельзя сделать выводы о распределении теплового поля по сечению заготовки. Кроме этого, комплекс ANSYS/LS-DYNA хотя и обладает большими возможностями, но мало приспособлен к моделированию горячей пластической деформации и весьма трудоемок.

В связи с этим были рассмотрены другие комплексы, позволяющие проводить моделирование процессов ОМД и получать данные по тепловым полям заготовки: QForm v4.3 и DEFORM v10. Исходные данные для моделирования приняты следующие:

- материал заготовки: сплав ВТ-6;
- температура нагрева: 950 °С;
- маршрут прокатки:  $\varnothing 112-105$  мм;
- угол подачи: 18°.

Заготовка при РСП совершает сложное винтовое движение, задать точную геометрию моделирования такого процесса с помощью базовых инструментов QForm затруднительно.

Простейшее моделирование процесса РСП заключается в следующем. Непрерывный процесс РСП разбивается на многократные единичные об-

жания заготовки (удары — в терминологии QForm) бойками, расположенными под углом  $120^\circ$ . Их профиль был выбран в соответствии с профилем реального очага деформации при РСП — обжимной участок с наклоном  $10^\circ$  и калибрующий с наклоном  $0^\circ$ , т.е. параллельно оси прокатки. Допущение обжатия плоским инструментом вместо круглого в сечении валка радиусом 200 мм приводит к разности в значениях контактной поверхности менее 10 % (3 мм в абсолютном значении), что сравнимо с шагом конечно-элементной сетки QForm, поэтому для данного применения не является критичным.

Для заготовки были заданы параметры поворота и перемещения за каждый шаг таким образом, чтобы она совершала винтовое движение аналогично процессу РСП. Величина перемещения составила 18 мм, угол поворота —  $23^\circ$ . Для максимального приближения дискретного процесса к непрерывному процессу РСП эти величины выбраны достаточно малыми, для того чтобы на один оборот заготовки приходилось не менее 15 шагов.

Время расчета по данной модели составило около 8 ч.

В результате моделирования картина напряжений и деформаций получена соответствующей той, что принята в вышеизложенной методике, однако значения температуры металла были занижены. Это обусловлено различиями между обжатиями вращающимися валками и поступательно движущимися бойками. Положение максимума скоростей деформации соответствует теории.

В отличие от QForm, пакет DEFORM позволяет задать произвольное количество деформирующих инструментов и любой закон движения металла, т.е. полностью смоделировать кинематику процесса РСП.

В момент захвата металла заготовки валками происходит контакт поверхности валков с поверхностью заготовки, вследствие чего в местах контакта сначала наблюдается снижение температуры за счет разницы температур валков и заготовки ( $20$  и  $1050^\circ\text{C}$ ), а затем в процессе начала прокатки за счет сил трения контактирующие участки начинают разогреваться до температуры порядка  $1150^\circ\text{C}$ . К концу прокатки металл разогрет в кольцевой зоне на расстоянии 10 мм от поверхности.

Учитывая, что по теории С.П. Галкина [2] именно вблизи поверхности происходит разогрев металла и выделение основной доли тепла, можно сделать вывод о соответствии теоретическим представлениям

принципа распределения тепловых полей по сечению заготовки при моделировании процесса в программном комплексе DEFORM. Однако, принимая во внимание завышенные данные по температуре в приповерхностной области и необоснованные резкие скачки в отдельных узлах конечно-элементной решетки, следует сказать, что комплекс DEFORM может использоваться для моделирования РСП, однако требуется существенная коррекция свойств материала.

Для выяснения причин ошибки был смоделирован процесс радиально-сдвиговой прокатки с аналогичным маршрутом, но заготовке был задан другой материал — сталь 45. В этом случае программа показала правдоподобные результаты, что говорит о неприменимости библиотечных моделей сплава ВТ6 в моделировании процесса РСП. Устранить подобную ошибку возможно путем создания нового материала в библиотеке материалов DEFORM. В связи с этим следует тщательно учитывать свойства металла, на котором будет производиться моделирование, и быть готовым к заданию новых моделей с учетом особенностей реологии и граничных условий, причем выраженных в параметрах и терминах, которые не являются традиционными в отечественной теории ОМД. Процесс трудоемкий и требует проведения ряда механических испытаний, однако эффективность комплекса DEFORM для дальнейшего моделирования оправдывает такие затраты.

## РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Помимо математического моделирования большое значение имеют методы экспериментальных исследований. В данной работе проводилось развитие некоторых способов контроля технологических параметров, принципы которых известны уже долгое время, однако в силу недостаточной информации или дороговизны оборудования эти способы мало распространены.

**Измерение и визуализация теплового поля металла (тепловидение).** Методика исследования позволяет осуществлять измерение температуры непрерывно и на значительной поверхности без какого-либо вмешательства в технологический процесс, используя доступные аналоговые или цифровые видеокамеры, предназначенные для бытовых целей, промышленного или охранного видеонаблюдения, а также цифровые фотоаппараты [3].

Непрерывным условием пригодности камеры является как можно меньшее воздействие на информацию, получаемую от ПЗС-матрицы, т.е. отсутствие функций автоматического изменения экспозиции, баланса белого, контрастности или возможность их гарантированного отключения («ручной режим», параметр настройки «М»).

Большинство выпускаемых камер (кроме охранных) имеют встроенный фильтр, отсекающий невидимую ИК-часть спектра с целью повышения естественности цветопередачи. Для измерения температур от 600 °С, когда видимое излучение достаточно интенсивно, это не имеет значения. Излучение становится видимым глазом начиная с 530—550 °С, однако ПЗС-матрица воспринимает и более длинноволновое излучение (800—1000 нм) при более низких температурах. Поэтому для измерения температур в диапазоне 400—600 °С необходимо выбирать камеру, имеющую возможность отключения данного фильтра (режимы, называемые «NightSurf», «0 Lux», «ночная съемка» и т.п.). Такими параметрами обладают, например, камеры «Sony».

Измерение температуры ниже 400 °С с помощью камер на ПЗС-матрицах невозможно, так как энергии фотонов излучения уже недостаточно для регистрации ПЗС. Для этого применяют микроболометрические матрицы, которые регистрируют излучение с более низкими температурами, включая отрицательные. Стоимость таких приборов по

сравнению с матрицами ПЗС выше в десятки раз. Однако при горячей обработке стали и титановых сплавов необходимость измерения температур ниже 400 °С практически не возникает.

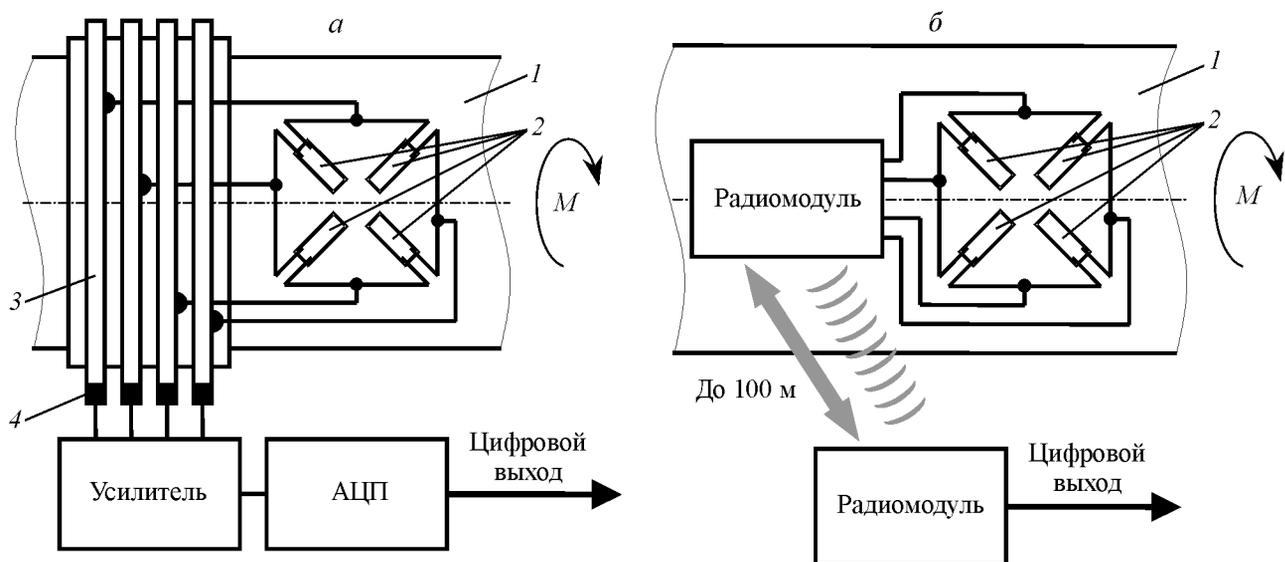
Особенностью всех бесконтактных способов измерения температуры является определение ее значений только на поверхности заготовки, в то время как наиболее ценным является знание теплового поля во всем объеме металла. Получить необходимую информацию возможно путем математического моделирования температурного поля с учетом ранее установленных экспериментальных значений температуры поверхности. Применение одного только компьютерного моделирования при разработке новых технологических режимов часто не обеспечивает должной точности результатов, так как граничные условия тепловой задачи возможно задать лишь приблизительно. Таким образом, имеются три дополняющих друг друга методики исследования:

1) тепловизионная съемка (позволяет получить наглядную картину теплового поля и провести хронометраж процесса);

2) измерение температуры отдельных зон сертифицированным пирометром (дает возможность повысить достоверность результатов тепловидения);

3) решение тепловой задачи с учетом экспериментальных данных (позволяет определить значенные температуры металла в объеме заготовки).

Применение подобной комплексной методики



**Рис. 2.** Схемы измерения крутящего момента – традиционная, со скользящими контактами (а), и дистанционная, с обработкой сигнала непосредственно на вращающемся валу (б)

1 – вал, 2 – тензорезисторы, 3 – контактные кольца, 4 – щетки  
Применяемые протоколы радиопередачи – Nordic, ZigBee, Wi-Fi

позволяет скорректировать, при необходимости, теоретические параметры теплообмена и существенно повысить достоверность результатов. Проведение такого исследования может позиционироваться как услуга для металлургических предприятий при отладке и экспертизе технологических процессов с участием горячей обработки металлов давлением.

**Измерение скорости перемещения и геометрических размеров изделий.** Непрерывное измерение линейной скорости и частоты вращения заготовки при прокатке в стане РСП является сложной задачей. К перспективным способам относится обработка цифрового видеозображения. Разработано программное обеспечение для распознавания границ изделия и вычисления расстояния между ними, которое будет зависеть от поперечного размера изделия.

По смещению соседних кадров производится вычисление перемещения изделия за время межкадрового интервала, а затем — его скорости и длины. Для работы программного обеспечения может быть использован стандартный видеосигнал от какой-либо уже имеющейся системы теленаблюдения, например от описанной выше системы тепловидения.

**Измерение крутящего момента.** Для станов РСП характерны тяжело нагруженные валы, вращающиеся с невысокой скоростью. Прямое измерение крутящего момента обычно сопряжено либо с необходимостью применения очень дорогостоящего датчика, монтируемого в муфту, либо с необходимостью передачи сигнала с тензодатчика на валу. Нами разрабатывается малогабаритное устройство, которое, будучи установленным непосредственно на объекте измерения, обрабатывает сигнал тензодатчика и передает его в цифровом виде по радиоканалу (рис. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования установлено, что направление прокатки в станах РСП оказывает существенное влияние на тепловое состояние металла. Рекомендуется применять грибовидную или реверсивную схемы прокатки. Меняя режимы обжатий, возможно оптимизировать величину тепловыделения при пластической деформации и снизить температуру и время нагрева заготовок. Это дает экономию электроэнергии на 70 кВт·ч/т. Широкие возможности для изучения процессов винтовой прокатки предоставляют метод конечных элементов и программные комплексы на его основе. Однако из-за большого количества циклов деформации за один проход решение оказывается очень чувствительным к адекватности задания граничных условий и результат моделирования может сильно расходиться с действительностью. Осуществить отладку математических моделей предлагается с помощью современных экспериментальных методов — тепловидения, бесконтактной передачи данных, анализа видеозображения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Восканьянц А.А., Иванов А.В.* Моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки на основе эйлерова описания движения сплошной среды. М.: Наука и образование, 2009.
2. *Галкин С.П.* Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков малопластичных сталей и сплавов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МИСиС, 1998.
3. *Романенко В.П., Тюрин В.А., Харитонов Е.А.* и др. // Металлург. 2001. № 3. С. 38.