

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-СКОРОСТНЫХ УСЛОВИЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ НА КАЧЕСТВО ТРУБ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА Zr-1%Nb

К.В. Ожмегов, М.И. Сергачева, А.А. Кабанов

В работе представлены результаты исследования качества внутренней поверхности трубы из сплава Zr-1%Nb после прокатки на стане типа KPW при вытяжке 3,9. Для исследования влияния степени и скорости деформации на сопротивление деформации сплава была разработана программа экспериментов на основе заводских условий и проведено физическое моделирование процесса прокатки. Физическое моделирование анализируемого процесса осуществлялось на серво-гидравлическом пластометре Gleeble 3800. В результате работы определены тепловой эффект пластической деформации (ТЭПД) и зависимость сопротивления деформации от степени и скорости деформации применительно к условиям неперывного и дробного нагружения при пильгерной прокатке труб.

Ключевые слова: пильгерная прокатка, сплав Zr-1%Nb, внутренняя поверхность труб, физическое моделирование.

INFLUENCE STUDYING THE STRAIN RATE CONDITIONS OF PILGRER ROLLING ON THE TUBE QUALITY AND RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ZIRCONIUM ALLOY

K.V. Ozhmegov, M.I. Sergacheva, A.A. Kabanov

The paper presents the results of investigation of the inner surface quality of Zr-1% Nb alloy tubes produced on a KPW-type pilger rolling mill with an elongation factor of 3.9. In order to analyze the effect of speeds and applied deformations on the variations in the magnitude of the flow stress of the investigated alloy, an experiment testing programme was carried out in industrial conditions and the physical modelling of the rolling process was performed. For the physical modelling of the process under examination, the metallurgical process simulator Gleeble 3800 was employed. The influence strain and strain rate on the flow stress have been obtained for the conditions of both intermittent and continuous cold deformation of the examined alloy.

Keywords: Pilger rolling, Zr-1%Nb alloy, tube inner surface defects, physical modelling.

Введение

Интенсификация пластической деформации сплавов на основе циркония при сокращении циклов холодной прокатки труб на пильгерных станах может приводить к ухудшению качества наружной и внутренней поверхностей полуфабрикатов и готовых труб. В этом случае на трубах после всех циклов холодной обработки давлением в большей или меньшей степени наблюдаются дефекты прокатного происхождения: наколы, раковины, повышенная шерохова-

тость поверхности, формирование переменного профиля трубы и др.

Задача оптимизации технологии холодного передела при изготовлении труб требует детального анализа всего комплекса физических процессов, влияющих друг на друга. Сложность анализа и моделирования процесса дробного нагружения, в том числе холодной прокатки, заключается в том, что на характер и уровень кривых течения «сопротивление деформации – степень деформации» $\sigma_s - \varepsilon$ сплавов циркония

оказывает влияние целый ряд взаимосвязанных условий и параметров: степень деформации в мгновенном очаге деформации; суммарная степень деформации за полный цикл прокатки; скоростной диапазон деформации; наличие теплового эффекта пластической деформации при прокатке труб.

Наилучшим образом влияние и взаимодействие этих параметров воспроизводится с помощью физического моделирования процесса дробной деформации применительно к условиям холодной прокатки труб на станах типа КРВ на современных пластометрических установках [1–4].

Целью данной работы являются определение причин появления дефектов на внутренней поверхности трубы и исследование влияния деформационно-скоростных параметров холодной пильгерной прокатки на сопротивление деформации σ_s сплава Zr-1%Nb.

Методика исследований

Для установления причин появления дефектов был отобран металл по длине очага деформации (рабочий конус) и проведены исследования качества внутренней поверхности трубы с использованием оптического микроскопа с увеличением $\times 10$, $\times 1000$. Анализ режимов пильгерной прокатки осуществлялся на серво-гидравлическом пластометре системы *Gleeble 3800* с использованием модуля *Pocket Jaw* по методике, описанной в работе [5]. Для проведения физического моделирования влияния условий прокатки на сопротивление деформации σ_s сплава Zr-1%Nb, цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 10 мм и высотой 12 мм вырезали из прутков диаметром 13 мм. Состояние материала – после холодной деформации и отжига, полностью рекристаллизованное, с величиной зерна на уровне 9–10 баллов. Испытания образцов проводили методом одноосного сжатия по программе непрерывного нагружения в диапазоне скоростей деформации от 0,5 до 15 с⁻¹ и дробного нагружения по режимам $i = 1, \dots, 4$ (рис. 1) при количестве обжатий n_i в диапазоне скоростей деформации 0,9–4,1 с⁻¹. Программа предусматривает изменение деформационно-скоростных условий прокатки по длине очага деформации прокатного стана типа КРВ. Режимы 1, 2 ($n_1 = n_2 = 19$ обжатий) и 4 ($n_4 = 10$ обжатий) рассчитаны на суммарную деформацию образца $\Sigma \epsilon = 0,65$ и описывают распределение деформаций, уменьшающихся

к концу цикла нагружения. Режим 3 ($n_3 = 20$ обжатий) рассчитан на суммарную деформацию образца $\Sigma \epsilon = 0,65$ и описывает распределение деформаций, уменьшающихся к концу цикла нагружения. Режим 4 отличается от режимов 1–3 более интенсивным нагружением, достижение суммарной деформации $\Sigma \epsilon = 0,65$ происходит за 10 обжатий. При таком нагружении пауза между деформациями увеличена с 2,4 с (для режимов 1–3) до 4,8 с. Данный режим моделирует прокатку с увеличенной подачей и уменьшенной частотой перемещения рабочей клетки прокатного стана в сравнении с другими режимами.

Контроль температуры испытаний осуществлялся с помощью хромель-копелевой термопары, приваренной к центральной части образца на установке *Therwocouple welder*, прилагаемой к комплекту *Gleeble 3800*. В качестве смазки при испытаниях применялись тонкие прокладки на основе графита. Рабочие бойки модели *ISO-T* после каждого испытания дополнительно смазывались графитовой смазкой марки OKS255.

Результаты исследования внутренней поверхности рабочего конуса

На внутренней поверхности рабочего конуса (рис. 2) после прокатки наблюдаются многочисленные дефекты, число и размер которых возрастают с увеличением степени деформации (рис. 3).

На начальном участке рабочего конуса (см. рис. 3, а) имеет место преимущественно однородная поверхность с шероховатостью Ra на уровне 0,2–0,3. Винтовой след, который наблюдается по всей длине рабочего конуса, образовался на стадии предыдущей операции в результате контакта рабочего инструмента с внутренней поверхностью трубы. На образце в продольном (см. рис 3, б) и поперечном направлении (рис. 4, а) к оси прокатки отмечается образование микротрещин глубиной

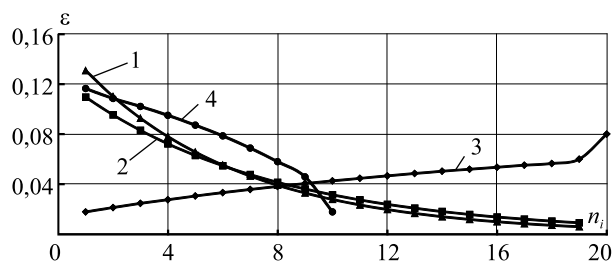


Рис. 1. Распределение деформации по режимам 1–4



Рис. 2. Внешний вид внутренней поверхности рабочего конуса из сплава Zr-1Nb при прокатке на стане типа КРВ

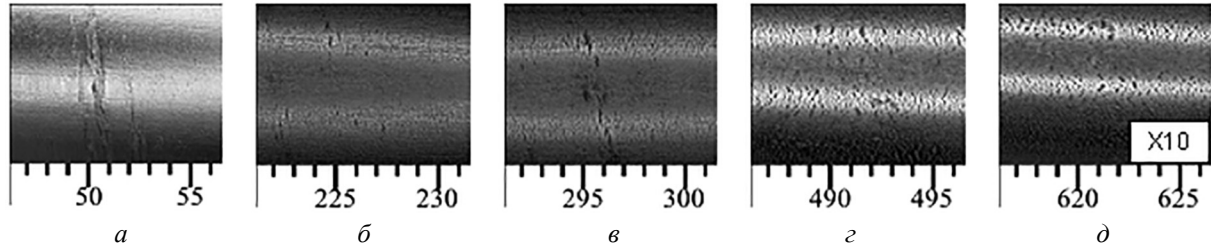


Рис. 3. Формирование внутренней поверхности трубы из сплава Zr-1Nb по длине очага деформации (о.д.) при прокатке на стане типа КРВ:
а – 10 % о.д.; б – 30 % о.д.; в – 40 % о.д.; г – 70 % о.д.; д – 90 % о.д.

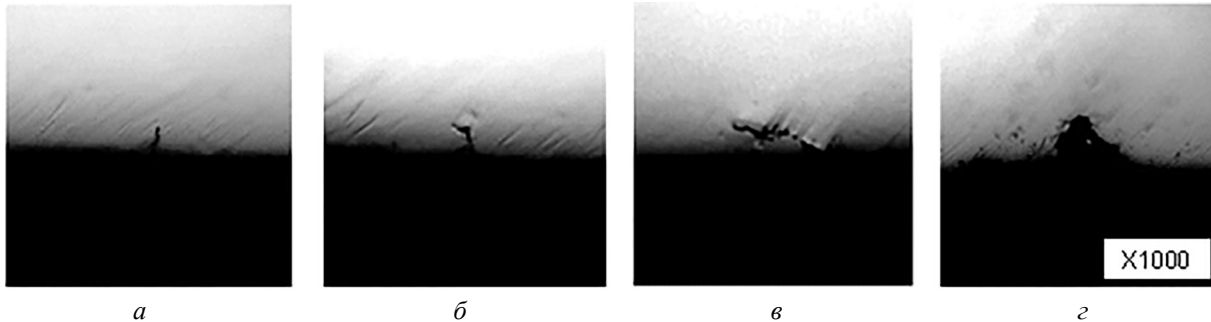


Рис. 4. Формирование дефектов в виде раковин на внутренней поверхности трубы из сплава Zr-1Nb по длине очага деформации (о.д.) при прокатке на стане типа КРВ:
а – 30 % о.д.; б – 40 % о.д.; в – 70 % о.д.; г – 90 % о.д.

от 1 до 3 мкм, направленных преимущественно под углом около $45-60^\circ$ к внутренней поверхности, раскрытие трещины не превышает 1 мкм. С последующим увеличением степени деформации отмечается изменение направления развития микротрещин, а также образование новых микротрещин до 3 мкм (см. рис. 3, в, г; рис. 4 б, в). При этом процесс зарождения микротрещин продолжается постоянно по длине очага деформации. Стоит отметить, что преимущественно зарождение микротрещин происходит непосредственно на появившихся дефектах или в непосредственной близости к ним. К концу обжимного участка (см. рис. 3, д) дефекты в виде раковин достигают размеров до 150 мкм в ширину и 15 мкм в глубину (см. рис. 4, г). Шероховатость R_a внутренней поверхности в конце очага деформации находится на уровне 0,7–0,9.

Для оценки степени деформирования поверхностных слоев были отобраны образцы

$N = 1, \dots, 7$ от рабочего конуса с шагом 100 мм от начала очага деформации. Анализ результатов замеров твердости HV (рис. 5) показал, что в процессе прокатки твердость материала уве-

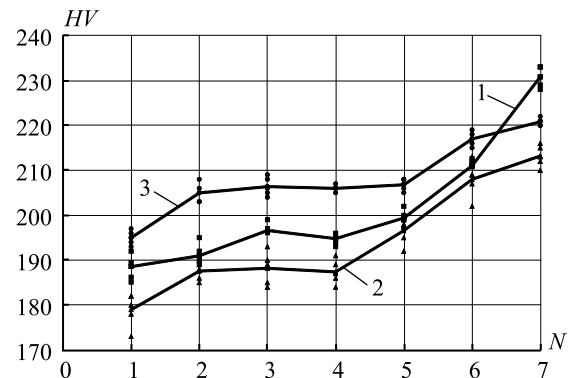


Рис. 5. График замеров твердости на образцах, отобранных по длине очага деформации от материала трубы при прокатке на стане типа КРВ:

1 – внутренняя поверхность; 2 – середина стенки; 3 – внешняя поверхность

личивается неравномерно. К моменту прохождения середины очага деформации, твердость материала трубы увеличилась не более чем на 8 %, причем увеличение примерно одинаково для внутренней поверхности, середины стенки и внешней поверхности. К концу очага деформации на внутренней поверхности наблюдается более интенсивное увеличение твердости, что, вероятнее всего, связано с увеличивающимся влиянием силы трения от взаимодействия трубы с оправкой прокатного стана.

Представленные данные (см. рис. 3–5) свидетельствуют о формировании дефектов внутренней поверхности в результате превышения предельной степени деформации сплава Zr-1%Nb на обжимном участке очага деформации при взаимодействии трубы с рабочим инструментом. Поэтому задача по повышению качества поверхности может быть решена путем определения режимов прокатки, обеспечивающих достижение заданной деформации при меньших значениях сопротивления деформации σ_s и коэффициента трения $\mu_{тр}$.

Результаты физического моделирования влияния условий прокатки на сопротивление деформации

На рисунке 6 представлены кривые течения $\sigma_s - \epsilon$ сплава Zr-1%Nb, полученные в условиях дробного нагружения образцов по режимам 1 и 3. По данным режимам до деформации $\epsilon = 0,3$ сопротивление деформации σ_s увеличивается до 900 МПа. При ϵ от 0,3 и выше σ_s стабилизируется в диапазоне 900–1050 МПа. Максимум на кривой $\sigma_s - \epsilon$ по режиму 1 незначительно смещен в сторону меньших деформаций. Увеличение разовых обжатий ϵ до 0,08 и скорости деформации $\dot{\epsilon} = 4,1 \text{ с}^{-1}$ к концу цикла нагружения, а также суммарной деформации до $\Sigma\epsilon \approx 0,69$ по режиму 3 не приводит к изменению уровня σ_s .

Вероятнее всего, в условиях холодной деформации при деформациях от 0,3 и выше напряжения достигают величин, достаточных для массовых двойных поперечных скольжений [6]. Происходит перестройка всей дислокационной структуры с некоторым уменьшением искажений кристаллической решетки. Наблюдается реакция между дислокациями противоположных знаков со взаимным их уничтожением и уменьшением поля внутренних напряжений. В результате, с увеличением степени дефор-

мации происходит постепенное уменьшение коэффициента упрочнения. К тому же сплавам на основе циркония присуща колебательная неустойчивость пластического течения [7]. Это явление проявляется на параболической стадии кривой пластического течения, при изменении картины распределения локальных деформаций во времени, и сопровождается периодическим накоплением деформации в ряде очагов устойчивой макролокализации, один из которых затем трансформируется в бочку при сжатии образца.

Анализ теплового эффекта пластической деформации (ТЭПД) показал, что разогрев образцов, деформированных по режимам 1 и 3, не превышал $\Delta T_{\max} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Причем по режиму 1 $\Delta T_{\max}$ смещен в сторону меньших деформаций $\epsilon = 0,2-0,4$.

Кривые течения $\sigma_s - \epsilon$ сплава Zr-1%Nb, полученные в условиях дробного нагружения образцов по режимам 2 и 4, представлены на рис. 7. Перераспределение деформации по режиму 4 обеспечивает суммарную деформацию образца $\Sigma\epsilon \approx 0,65$ за 10 обжатий, при этом сопротивление деформации σ_s несколько ниже, чем при

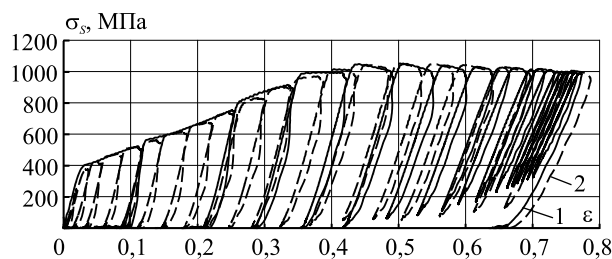


Рис. 6. Кривые течения $\sigma_s - \epsilon$ сплава Zr-1%Nb в условиях дробного нагружения по режимам 1 и 3, полученные в результате физического моделирования условий холодной пильгерной прокатки на Gleeble 3800: 1 – режим 1; 2 – режим 3

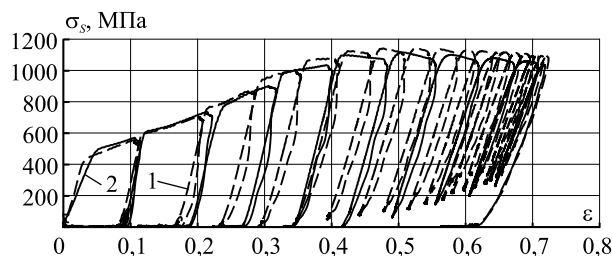


Рис. 7. Кривые течения $\sigma_s - \epsilon$ сплава Zr-1%Nb в условиях дробного нагружения по режимам 2 и 4, полученные в результате физического моделирования условий холодной пильгерной прокатки на Gleeble 3800: 1 – режим 2; 2 – режим 4

обжатии образца по режиму 2. В диапазоне деформаций ε от 0,2 до 0,65 разница $\Delta\sigma_s$ составляет до 60 МПа. Снижение уровня σ_s можно объяснить увеличивающимся значением ТЭПД. Так, при обжатии по режиму 4 максимальный разогрев $\Delta T_{\max}$ в результате действия теплового эффекта пластической деформации составляет 80 °С и находится в диапазоне деформации ε от 0,3 до 0,5. По режиму 2 $\Delta T_{\max}$ ТЭПД составляет 50 °С и смещен в сторону меньших деформаций $\varepsilon = 0,15-0,4$.

На рисунке 8 представлены кривые течения $\sigma_s - \varepsilon$ сплава Zr-1%Nb, полученные в условиях непрерывного нагружения образцов в скоростном диапазоне от 0,5 с⁻¹ до 15 с⁻¹. Пластическая деформация в указанном скоростном диапазоне начинается при сопротивлении деформации $\sigma_s = 400-500$ МПа и до значения $\varepsilon \approx 0,25$ осуществляется при постоянном коэффициенте упрочнения. При $\varepsilon > 0,25$ коэффициент упрочнения незначительно уменьшается. Следует отметить, что с повышением скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ до 15 с⁻¹ разница в уровне сопротивления деформации σ_s сокращается. Объяснением этому может быть возрастающее влияние ТЭПД на сопротивление деформации σ_s . При скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 0,5$ с⁻¹, тепловой эффект пластической деформации составляет $\Delta T \approx 110$ °С, при $\dot{\varepsilon} = 5$ с⁻¹ ТЭПД достигает $\Delta T \approx 130$ °С, а при $\dot{\varepsilon} = 15$ с⁻¹ $\Delta T \approx 150$ °С.

Сравнение кривых дробного и непрерывного нагружения ($\dot{\varepsilon}$ в интервале от 0,5 до 5 с⁻¹) сплава Zr-1%Nb показало, что до деформации $\varepsilon \approx 0,2$ напряжения σ_s находятся на одном уровне. При деформации $\varepsilon > 0,2$ кривые течения, полученные при дробном нагружении, проходят выше кривых течения, полученных при непрерывном

нагружении. Наличие пауз между обжатиями способствует уменьшению влияния ТЭПД на сопротивление деформации σ_s .

Из анализа результатов, представленных на рис. 6–8, следует, что на сопротивление деформации σ_s в условиях холодной прокатки оказывает влияние комплекс факторов. Среди них следует обратить внимание на скорость деформации $\dot{\varepsilon}$, степень деформации ε и величину теплового эффекта пластической деформации. Повышение скорости деформации приводит к большему разогреву и к уменьшению коэффициента упрочнения металла. Увеличение влияния теплового эффекта пластической деформации требует выбора смазывающих материалов, обеспечивающих снижение контактного трения между инструментом и прокатываемым металлом.

Выводы

По результатам исследований сформулированы следующие выводы.

1. Формирование дефектов на внутренней поверхности происходит в результате превышения предельной степени деформации сплава Zr-1%Nb на обжимном участке очага деформации при взаимодействии трубы с рабочим инструментом;

2. По полученным зависимостям сопротивления деформации σ_s сплава Zr-%Nb от деформационно-скоростных параметров в условиях дробного и непрерывного нагружения, приближенных к условиям холодной прокатки труб, установлено, что интенсификация процесса прокатки приводит к повышению теплового эффекта пластической деформации и снижению сопротивления деформации. Отмечено, что кривые непрерывного нагружения могут быть использованы для описания процесса холодной прокатки до деформации, не превышающей $\varepsilon \approx 0,2$.

Заключение

В результате проведенных исследований установлены причины появления дефектов на внутренней поверхности трубы и влияние деформационно-скоростных параметров холодной пильгерной прокатки на сопротивление деформации σ_s сплава Zr-1%Nb. Полученные результаты могут быть использованы в качестве входных параметров для математического моделирования исследуемого процесса, а также при разработке геометрии калибров и режимов пильгерной прокатки труб из сплава Zr-1%Nb.

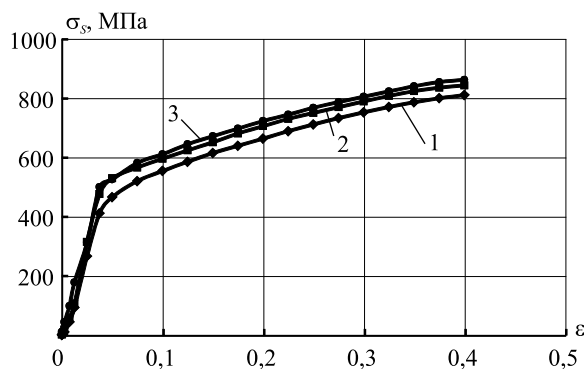


Рис. 8. Кривые течения для сплава Zr-1%Nb при $T = 20$ °С и различных скоростях деформации, полученные методом одноосного сжатия на Gleeble 3800: 1 – 0,5 с⁻¹; 2 – 5 с⁻¹; 3 – 15 с⁻¹

Список литературы

1. Ожмегов К.В. Экспериментальное моделирование процесса многоступенчатой свободнойковки заготовок из сплава Э635 // Сборник тезисов ОНТК молодых специалистов ОАО «ЧМЗ». 2013. С. 31–32.
2. Усовершенствование режима горячейковки слитка сплава Э110 на основе результатов физического моделирования / К.В. Ожмегов., А.С. Заводчиков, М.Н. Саблин и др. // ВАНТ. Материаловедение и новые материалы. 2015. № 1(80). С. 22–30.
3. Разработка технологииковки слитка для изготовления укрупненной заготовки из сплава Э635 на основе результатов физического и компьютерного моделирования деформационно-термических условий / К.В. Ожмегов, А.С. Заводчиков, М.И. Сергачева и др. // ВАНТ. Материаловедение и новые материалы. 2016. № 1 (84). С. 8–16.
4. Галкин А.М., Дыя Х., Ожмегов К.В. К неравномерности течения металла в условиях динамического нагружения // Международная конференция «Прогрессивные технологии пластической деформации» МИСиС, 2009. С. 259–266.
5. Galkin A. Plastometric studies of metals and alloys. University Press of the Czestochowa University of Technology. Czestochowa, 1990. – 142 p.
6. Мочалов Н.А., Галкин А.М., Мочалов С.Н. Пластометрические исследования металлов. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 318 с.
7. Пшеничников А.П. Неустойчивость пластического течения в ГПУ сплава циркония: дис. канд. ф-м. наук. Томск, 2010. – 183 с.

Материал поступил в редакцию 05.09.2017

ОЖМЕГОВ Кирилл Владимирович E-mail: kirillozhmegov@yandex.ru Тел.: (499) 190-84-38	Кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: физическое моделирование процессов ОМД, исследование реологических характеристик цветных сплавов. Автор более 30 научных статей.
СЕРГАЧЕВА Мария Игоревна E-mail: mrs.deetz@gmail.com Тел.: (499) 190-84-38	Аспирант, инженер-технолог 1 категории АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: металловедение и термическая обработка металлов, трибология, механика разрушения, обработка металлов давлением. Автор 5 научных статей.
КАБАНОВ Александр Анатольевич E-mail: AAKabanov@bochvar.ru Тел.: (499) 190-84-38	Заместитель директора отделения, начальник отдела АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Сфера научных интересов: обработка металлов давлением. Автор более 80 научных статей.