

УДК 621.771.014

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ ПРИ ОСВОЕНИИ НОВЫХ МАРОК РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ*

Уманский А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии
черных металлов (umanskii@bk.ru)

Головатенко А.В.², к.т.н., начальник рельсового производства (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)

Кадыков В.Н.¹, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК (kadikov_vn@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
(654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

Аннотация. Анализ существующих методик теоретического определения сопротивления сталей пластическому деформированию позволил выявить ряд их существенных недостатков, в частности отсутствие учета влияния химического и фазового составов стали, истории нагружения. Обусловленное перечисленными недостатками ограничение по области применения не позволяет считать эти методики пригодными для получения достоверных прогнозных значений энергосиловых параметров прокатки применительно к вновь осваиваемым маркам стали, в частности к сложнoleгированным рельсовым сталям. На основании вышесказанного сделан вывод о необходимости проведения экспериментальных исследований сопротивления пластической деформации таких сталей при различном сочетании температурно-скоростных параметров прокатки, степени деформации и варьировании химического состава стали. Указанные исследования применительно к стали марки Э78ХСФ проведены с использованием комплекса для физического моделирования термомеханических процессов «Gleeble System 3800». На основании математической обработки полученных экспериментальных данных разработана методика численного определения сопротивления рельсовых сталей пластическому деформированию при изменяющихся термомеханических параметрах прокатки (температура, скорость и степень деформации) и нестабильном химическом составе стали. Характер полученных экспериментальных зависимостей свидетельствует о снижении сопротивления пластическому деформированию стали Э78ХСФ при повышении температуры ее деформации в интервале температур прокатки и повышении сопротивления пластическому деформированию при увеличении скорости деформации в интервале изменения данного параметра на рельсобалочных станах, что согласуется с общепринятыми представлениями. Экспериментальные данные позволяют говорить о ярко выраженном нелинейном характере зависимости сопротивления стали Э78ХСФ пластическому деформированию от степени деформации, что свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации в дополнении к динамическому возврату и полигонизации. Анализ влияния химического состава стали Э78ХСФ на ее сопротивление пластическому деформированию свидетельствует о повышении этой характеристики при увеличении концентрации в стали углерода, марганца, серы и фосфора и снижении сопротивления пластической деформации при увеличении содержания ванадия в стали. Полученные данные об отсутствии влияния на сопротивление пластической деформации стали Э78ХСФ изменения концентрации кремния и хрома (в рамках интервала изменения, соответствующего требованиям стандартов) позволяет сделать вывод о возможности использования разработанной методики расчета для определения сопротивления пластической деформации рельсовых сталей, не легированных указанными элементами. Адекватность предложенной методики подтверждена исследованиями энергосиловых параметров прокатки в условиях действующего универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для сталей различного химического состава.

Ключевые слова: энергосиловые параметры прокатки, сопротивление деформации, рельсовая сталь, экспериментальные исследования, термомеханические параметры прокатки, химический состав стали.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-804-810

Энергосиловые параметры прокатки, к числу которых относят усилие, момент и мощность прокатки, оказывают определяющее влияние на эффективность процесса производства готового проката. Повышенные нагрузки на основное и вспомогательное оборудование прокатных станов приводят к увеличению его износа, повышают частоту и продолжительность простоев на ремонты. В свою очередь недозагруженность оборудования обуславливает снижение производительности прокатного стана.

* Работа выполнена в СибГИУ в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.6365.2017/8.9.

При определении энергосиловых параметров прокатки расчетными методами наибольшую сложность представляет выбор величины сопротивления пластической деформации (СПД). Указанный показатель входит в качестве множителя в формулу для расчета усилия прокатки и, следовательно, от него напрямую зависят все энергосиловые параметры прокатки. На сегодняшний день в специальной и справочной литературе имеются данные о СПД ограниченного числа марок сталей и сплавов, а теоретические методы определения СПД достаточно сложны в силу необходимости уче-

та совместного воздействия на этот показатель целого ряда параметров: химического состава и структуры прокатываемого материала, термомеханических параметров деформации (температуры, степени и скорости деформации), истории нагружения.

Касательно физического смысла понятия СПД подавляющее большинство исследователей сходится во мнении [1 – 4], что данный показатель выражается как напряжение одноосного растяжения или сжатия в условиях развитой пластической деформации, или как интенсивность напряжений, достаточная для осуществления пластической деформации материала при заданных условиях деформации. Следует особо подчеркнуть, что СПД является именно характеристикой материала, а не процесса его обработки давлением, и этот показатель неправомерно отождествлять с такими параметрами, как среднее удельное давление металла на валки при прокатке, предел текучести, предел прочности [3].

Сложность теоретического определения СПД обуславливает широкое применение экспериментальных методов исследований с использованием механических испытаний образцов в горячем состоянии. С целью максимального приближения условий испытаний при одноосной деформации к реальным условиям прокатки, а именно для реализации закона деформации, аналогичного прокатке, используют испытательные машины специальных конструкций – кулачковые пластометры.

Следует отметить, что для кулачковых пластометров характерен ряд существенных недостатков, которые обусловили применение в качестве их альтернативы универсальных испытательных установок, позволяющих поддерживать заданные законы деформации. В качестве примера таких установок можно привести электромеханические и сервогидравлические установки компании «Instron», установки «Gleeble» производства компании «Dynamic Systems Inc.» (США).

К настоящему моменту накоплен значительный объем данных о результатах экспериментального определения СПД различных марок сталей и сплавов. Целым рядом авторов сделаны попытки аппроксимации экспериментальных данных о зависимости СПД от термомеханических параметров деформации (температуры, скорости и степени деформации). В работе [5] А.Л. Остапенко с соавторами приводят более 40 вариантов формул для расчета СПД различных марок сталей.

В качестве общей характерной особенности таких методик численного определения СПД, являющейся одновременно и их недостатком, можно отметить ограничение области применения. Наличие в формулах «базовых» значений СПД (СПД при определенных термомеханических параметрах деформации) и эмпирических коэффициентов (констант) обуславливает возможность их использования только для определенных марок сталей и сплавов, в которых указанные параметры были заранее определены.

В частности, С.В. Карповым с соавторами показано [6], что применение имеющихся формул для расчета СПД позволяет получать достоверные данные только для возрастающих кривых в координатах СПД – степень деформации ($\sigma - \epsilon$). При ином характере зависимостей СПД от степени деформации (например, кривые с выраженным максимумом) расчетные значения СПД имеют значительную погрешность, что проиллюстрировано на примере стали марки 09Г2ФБ. Согласно полученных А.Л. Остапенко с соавторами данных [7], применение имеющихся методик расчета СПД не позволяет получать стабильно низкую погрешность расчетных данных относительно фактических значений СПД: при определенном сочетании термомеханических параметров прокатки погрешность может достигать 25 % и более.

Существенным недостатком имеющихся методик расчета СПД является также отсутствие учета влияния таких параметров, как химический и фазовый составы деформируемых сталей, истории нагружения. Авторами многочисленных работ [8 – 11] показано, что обязательным условием хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных СПД различных марок сталей является использование моделей, учитывающих структурные изменения в процессе деформации.

Для описания СПД материала с учетом истории нагружения необходимо использовать динамические модели, в основу которых положены интегральные уравнения или системы дифференциальных уравнений. При этом с точки зрения практического использования более предпочтительными представляются динамические модели, основанные на дифференциальных уравнениях [12, 13], поскольку в этом случае реализуется возможность учета вклада отдельных процессов разупрочнения (статический возврат, статическая рекристаллизация, метадинамическая рекристаллизация); кроме того, указанные модели менее сложны с математической точки зрения. Примером такого типа моделей является структурно-феноменологическая модель А.В. Коновалова [8], в основе которой лежит положение, что основным процессом разупрочнения является динамическая рекристаллизация.

При рассмотрении влияния химического состава стали на СПД следует отметить, что по данным многочисленных работ [3, 6 и др.] повышение содержания постоянных примесей (углерода, марганца, кремния) способствует повышению СПД сталей различных марок. Касательно легирующих элементов можно отметить, что в большинстве случаев они повышают СПД сталей и их влияние возрастает с увеличением концентрации их в стали.

В целом можно констатировать, что несмотря на наличие значительного количества экспериментальных данных о СПД различных сталей и сплавов, имеющихся статических и динамических моделях описания СПД, проблема определения действительных значений

СПД конкретных марок сталей для заданных условий прокатки остается по-прежнему актуальной.

Поскольку, как показано выше, перенос имеющихся данных о значениях СПД на стали иного химического состава невозможен, то для ряда марок сталей и сплавов существует значимая необходимость проведения экспериментальных исследований СПД. К таким маркам стали, прежде всего, следует отнести вновь осваиваемые марки стали (IF-стали, сверхнизкоуглеродистые стали) и стали ответственного назначения (мартенситно-старяющие стали). В качестве подтверждения актуальности рассматриваемой тематики можно привести ряд проведенных в последние годы исследований [14 – 17].

Также к перечню вновь осваиваемых марок стали, безусловно, относятся сложнолегированные рельсовые стали, использование которых для производства железнодорожных рельсов в последние годы обусловлено необходимостью обеспечения требований отечественных и зарубежных стандартов по механическим свойствам дифференцированно закаленных рельсов. В частности, на новом универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» после запуска в эксплуатацию в качестве основной марки стали для производства длинномерных (длиной 100 м) дифференцированно закаленных рельсов используется хромистая рельсовая сталь Э78ХСФ. Проектирование и совершенствование режимов прокатки рельсов на новом прокатном стане выявило значимую необходимость в получении достоверных данных о прогнозных значениях энергосиловых параметров прокатки, что обусловило актуальность проведения исследований сопротивления деформации рельсовых сталей новых марок.

Исследования сопротивления деформации рельсовой стали Э78ХСФ проведены на установке «Gleeble System 3800» [18, 19]. Комплекс «Gleeble System 3800» пред-

назначен для исследования свойств металлов и сплавов путем имитации процессов горячей деформации.

Для реализации различных схем деформирования в комплексе «Gleeble System 3800» предусмотрены четыре сменных блока (модуля):

- «Pocket Jaw» (растяжение/сжатие);
- «Hydrawedge» (гидроломот);
- «MAXStrain» (модуль для многоосевой деформации);
- «Torsion» (кручение).

Все перечисленные модули имеют одинаковые принципы работы и отличаются лишь схемой деформации. В частности, при использовании любого модуля нагрев образцов осуществляется прямым пропусканием тока, при этом контроль температуры производится контактными термопарами или лазерным пирометром; обработка образцов осуществляется в вакууме (до 10^{-5} мм рт. ст.), в защитном газе или на воздухе.

При проведении исследований использовали модуль «Hydrawedge» (рис. 1), разработанный для моделирования ударного нагружения образцов с высокой точностью по степени и скорости деформации. Специальная конструкция модуля позволяет выполнять многостадийные последовательные нагружения, полностью воспроизводящие режимы деформации на прокатном стане.

Конструкция модуля предусматривает выполнение экспериментов в двух вариантах: «Flow Stress» (классическая деформация путем одноосного сжатия между двумя плоскими бойками) и «Plane Strain» (плоская деформация между клиновидными бойками – форма бойков позволяет соблюдать условие неизменной площади контакта под бойками в процессе деформации). При проведении экспериментальных исследований использован первый вариант деформации (рис. 2).

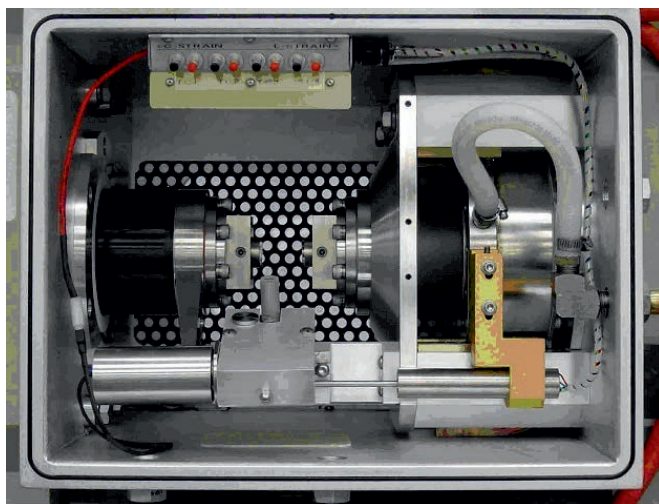


Рис. 1. Общий вид модуля «Hydrawedge» установки «Gleeble System 3800»

Fig. 1. General view of “Hydrawedge” module of “Gleeble System 3800” installation

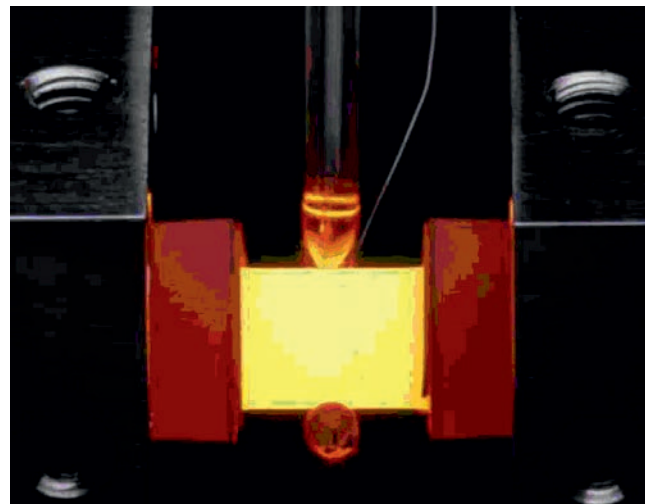


Рис. 2. Схема деформации «Flow Stress» (одноосное сжатие между двумя плоскими бойками)

Fig. 2. “Flow Stress” deformation scheme (uniaxial compression between two flat dies)

Перед испытанием при помощи системы вакуумных насосов в рабочей камере установки «Hydrawedge II» создается вакуум для уменьшения окисления при повышенных температурах. Испытания проводили на цилиндрических образцах, полученных из непрерывнолитых заготовок стали Э78ХСФ текущего производства электросталеплавильного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Режим испытаний включал (рис. 3): нагрев со скоростью 5 °C/c до температуры 1200 °C, изотермическую выдержку при указанной температуре, подстуживание стали со скоростью 10 °C/c до температуры деформации в интервале 900 – 1150 °C с шагом 50 °C, деформацию методом сжатия со скоростями 0,1, 1,0 и 10 с⁻¹.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных с использованием стандартной методики множественного регрессионного анализа позволила получить нижеприведенные уравнения регрессии, устанавливающие совместное влияние термомеханических параметров прокатки и химического состава стали марки Э78ХСФ на ее СПД [20]:

$$\sigma = A e^{m_1 t} \varepsilon^{m_2} e^{\frac{m_3}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_4} e^{m_5 \varepsilon} u^{m_6} t, \quad (1)$$

где A , $m_1 - m_6$ – коэффициенты уравнения, зависящие от химического состава стали; e – число Эйлера; t – температура прокатки, °C; ε – логарифмическая степень деформации; u – скорость деформации, с⁻¹.

Коэффициенты $m_1 - m_6$ в зависимости от содержания в стали серы, ванадия, фосфора, углерода и марганца [S], [V], [P], [C], [Mn] рассчитывали так:

$$A = 4365,4 + 69\,118[S], \quad (2)$$

$$m_1 = -0,0033 - 0,0043[V], \quad (3)$$

$$m_2 = 0,2607 - 5,7663[P], \quad (4)$$

$$m_3 = -0,0025 - 0,00308[C] + 0,00025[Mn], \quad (5)$$

$$m_4 = -0,0015 + 0,0475[P], \quad (6)$$

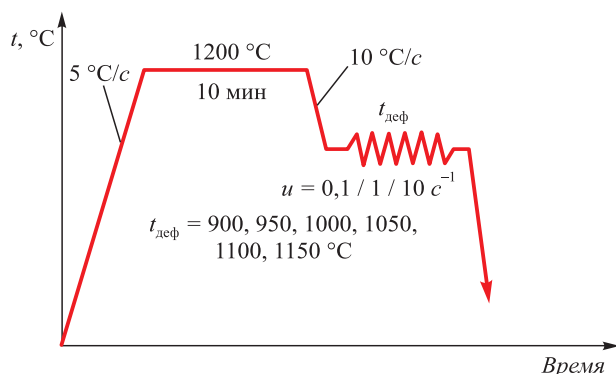


Рис. 3 Режим испытаний образцов рельсовой стали марки Э78ХСФ

Fig. 3. Testing mode of E78KhSF rail steel samples

$$m_5 = -0,407 + 0,655[Mn], \quad (7)$$

$$m_6 = 0,0002 - 0,0012[V]. \quad (8)$$

Выбор вида уравнений регрессии проводился исходя из максимального значения коэффициента детерминации.

Полученные данные (уравнение (1)) свидетельствуют о снижении СПД стали Э78ХСФ при повышении температуры деформации и обратного характера зависимости СПД от скорости деформации, что согласуется с общепринятыми представлениями. Основываясь на экспериментальных данных, большинство исследователей [1 – 4, 6 и др.] сходятся во мнении, что повышение температуры деформации в интервале температур прокатки приводит к снижению сопротивления деформации по экспоненциальному закону. Механизм влияния скорости деформации на СПД заключается в том, что с повышением скорости деформации процессы упрочнения ускоряются, а скорость конкурирующих процессов разупрочнения при этом остается неизменной. Упрочнение реализуется за счет повышения плотности дислокаций и точечных дефектов, увеличения сил внутреннего трения. Касательно влияния степени деформации на СПД рассматриваемой стали можно отметить ярко выраженный нелинейный характер зависимости (рис. 4). На кривой текучести (рис. 4) наблюдается увеличение СПД на начальном участке, связанное с деформационным упрочнением, затем видна остановка роста и дальнейшее снижение СПД. На основании имеющихся данных [2] можно предположить, что наличие достаточно ярко выраженного максимума СПД свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации в дополнении к динамическому возврату и полигонизации. Хотя справедливости ради следует отметить, что существует мнение [21, 22] о возможности

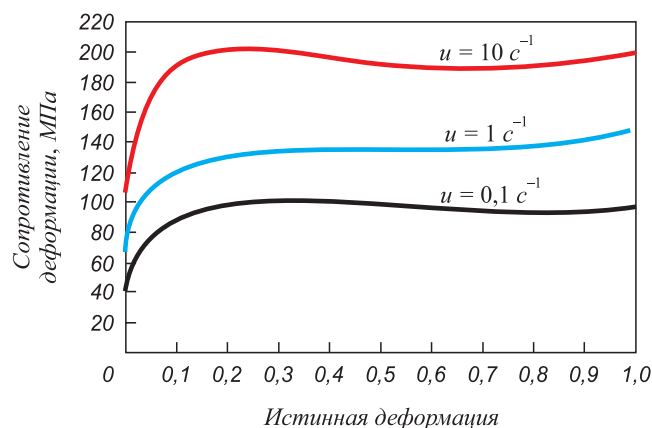


Рис. 4. Пример экспериментальных зависимостей сопротивления стали Э78ХСФ пластической деформации от термомеханических параметров прокатки

Fig. 4. Example of experimental dependences of E78KhSF steel resistance to plastic deformation on thermomechanical rolling parameters

протекаания рекристаллизации без наличия максимума на кривой текучести. Динамическая рекристаллизация возникает при достижении критического значения деформации, равного 80 – 90 % от значения деформации, соответствующего максимуму на кривой текучести. По мнению авторов работы [23], выпуклые кривые текучести характерны для большинства металлов и сплавов.

Анализ влияния химического состава стали Э78ХСФ на ее СПД (уравнения (2) – (8)) свидетельствует о повышении данной характеристики при увеличении концентрации в стали углерода, марганца, серы и фосфора и снижении СПД при увеличении содержания ванадия в стали. В численном выражении наибольшее влияние на СПД оказывает содержание ванадия и серы в стали в фактическом интервале их изменения на промышленных плавках. Так, повышение содержания ванадия с 0,04 до 0,07 % приводит к снижению сопротивления деформации в 1,24 – 1,27 раза, а увеличение концентрации серы с 0,005 до 0,015 % обуславливает повышение сопротивления деформации в 1,14 раза. Повышение содержания фосфора с 0,012 до 0,017 % и марганца с 0,78 до 1,09 % приводит к увеличению сопротивления деформации до 10 и 5 % соответственно, а при увеличении концентрации углерода в стали с 0,75 до 0,79 % рост сопротивления деформации не превышает 1 %.

Следует отметить, что полученные данные о характере влияния содержания углерода и марганца в стали Э78ХСФ на ее СПД (уравнения (5), (7)) согласуются с результатами ранее проведенных исследований для других марок стали и имеют обоснованное теоретическое объяснение [2, 3, 7]. При этом анализ механизма влияния на СПД содержания таких элементов, как сера, фосфор и ванадий (уравнения (2) – (4), (6), (8)) требует проведения дальнейших исследований. Отсутствие влияния на СПД стали Э78ХСФ изменения концентрации кремния и хрома (в рамках интервала изменения, соответствующего требованиям стандартов) позволяет сделать вывод о возможности использования разработанной методики расчета для определения СПД рельсовых сталей, не легированных указанными элементами.

Адекватность предложенной методики расчета СПД подтверждена исследованиями энергосиловых параметров прокатки в условиях действующего универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [24]. Погрешность прогнозных данных по усилию прокатки в обжимных клетях стана при использовании исходных заготовок различного химического состава не превысила 10 % относительно фактических значений.

Выводы. Проведенный анализ имеющихся методик теоретического определения сопротивления сталей пластическому деформированию показал невозможность их применения для сложнолегированных рельсовых сталей. На основании экспериментальных данных, полученных при горячих испытаниях образцов рельсовой стали Э78ХСФ на установке «Hydrawedge» комплекса для физического моделирования «Gleeble

System 3800», разработана методика численного определения сопротивления рельсовых сталей пластическому деформированию при изменяющихся термомеханических параметрах прокатки (температуре, скорости и степени деформации) и нестабильном химическом составе. Проверка адекватности предложенной методики в условиях промышленного рельсобалочного стана показала достаточно высокую сходимость расчетных и фактических значений энергосиловых параметров прокатки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю.Г. Калпин, В.И. Перфилов, П.А. Петров, В.А. Рябов и др. – М.: Машиностроение, 2011. – 244 с.
2. Перетяtko В.Н., Темлянцев М.В., Филиппова М.В. Пластичность и разрушение сплавов в процессах нагрева и обработки давлением. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.
3. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. – М.: Металлургия, 1964. – 270 с.
4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
5. Остапенко А.Л., Руденко Е.А., Курдюкова Л.А. Оценка влияния методики определения сопротивления деформации на погрешность расчета силы горячей прокатки полос и листов // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2013. № 6. С. 38 – 44.
6. Карпов С.В., Банщиков А.А., Карпова А.С. Сопротивление деформации марганцовистых сталей // Ползуновский альманах. 2008. № 3. С. 123 – 126.
7. Остапенко А.Л., Переходченко В.А., Кушнин О.Н., Платун Д.А. О применимости методик расчета сопротивления деформации для оценки энергосиловых условий горячей прокатки полос // Сталь. 2014. № 5. С. 41 – 52.
8. Konovalov A.V. Viscoplastic model for the resistance of metals to high-temperature deformation // Russian metallurgy (Metally). 2005. 2005. No. 5. P. 456 – 459.
9. Hildenbrand A., Molinari A., Baczynski J. Self-consistent polycrystal modelling of dynamic recrystallization during the shear deformation of A Ti IF steel // Acta mater. 1999. Vol. 47. No. 2. P. 447 – 460.
10. Marx E. Simulation of primary recrystallization // Acta mater. 1999. Vol. 47. No. 4. P. 1219 – 1230.
11. Manonukul A., Dunne N. Dynamic recrystallization // Acta mater. 1999. Vol. 47. No. 7. P. 4339 – 4354.
12. Ding R., Guo Z. X. Microstructural modeling of dynamic recrystallization using an extended cellular automaton approach // Computational Materials Science. 2002. No. 23. P. 209 – 218.
13. Goetz R.L., Seetharaman V. Modeling dynamic recrystallization using cellular automata // Scripta Materialia. 1998. Vol. 38. No. 3. P. 405 – 413.
14. Гладковский С.В., Потапов А.И., Лепихин С.В. Исследование сопротивления деформации мартенситно-старееющей стали ЭП679 // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. Iss. 4. P. 18 – 28.
15. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the Resistance of Steels 18KhMFB And 18Kh3MFB to Hot Deformation // Metallurgist. 2016. Vol. 59. Iss. 11. P. 1118 – 1121.
16. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08Kh18N10T steel at a hot-deformation temperature // Russian metallurgy (Metally). 2008. Vol. 2008. No. 2. P. 138 – 141.
17. Потапов А.И., Батуева Е.А. Сопротивление деформации кремнемарганцовистых сталей для арматуры // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 10. С. 38 – 40.

18. Golovatenko A.V., Dorofeev V.V., Trusov V.A., Volkov K.V., Dobryanskii A.V. Analysis of Experimental Dependence of Rail Steel E78KhSF Deformation Resistance on Deformation Temperature, Rate, and Degree // *Metallurgist*. 2015. Vol. 58. Iss. 5. P. 528 – 534.
19. Уманский А.А., Головатенко А.В., Кадыков В.Н. Исследование влияния химического состава рельсовой стали на сопротивление деформации при прокатке // *Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2015. Вып. 35. С. 52 – 59.
20. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 12 – 29.
21. Queen H.J., Jonas J.J. *Plastic Deformation of Materials*. New York: Academic Press, 1975. – 493 p.
22. *The Hot Deformation of Austenite*: edited by J.B. Ballance. New York: AIME, 1977. – 631 p.
23. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
24. Golovatenko A.V., Umansky A.A., Kadykov V.N. Improvement of rolling modes of long length rails on the universal rail and structural steel mill “EVRAZ ZSMK” // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 12 – 28.

Поступила 14 марта 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 10, pp. 804–810.

DEVELOPMENT OF THEORETICAL BASIS OF DETERMINING ENERGY-POWER PARAMETERS OF ROLLING WITH DEVELOPMENT OF NEW GRADES OF RAIL STEEL

A.A. Umanskii¹, A.V. Golovatenko², V.N. Kadykov¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² JSC “EVRAZ - Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The analysis of existing methods of theoretical determination of the resistance of steels plastic deformation revealed a number of significant shortcomings of the loading history, particularly, the lack of consideration the influence of chemical and phase composition of the steel. Due to limitations on the application of these drawbacks do not allow to consider these techniques as suitable for the preparation of reliable predictive values of energy-power rolling parameters according to the newly developed steel grades, in particular for complex-alloyed rail steel. Therefore, the conclusion about the necessity of experimental studies on plastic deformation resistance of steels at various combinations of temperature and speed of rolling, the degree of deformation and varying the chemical composition of steel was made. These studies applied to E78KhSF steel were performed using the complex for physical modeling for thermomechanical processes “Gleeble System 3800”. On the basis of mathematical processing of the experimental data the technique of numerical determination of the resistance of rail steel to plastic deformation under varying thermomechanical rolling parameters (temperature, speed and degree of deformation) and volatile chemical composition of steel was carried out. The nature of the experimental dependences indicates a decline in resistance to plastic deformation of E78KhSF steel with increasing temperature deformation in the rolling temperature range and improving the resistance to plastic deformation with increasing strain rate in the range of variation of this parameter in the rolling mill, which is consistent with the generally accepted views. Experimental evidence suggests the pronounced nonlinear character of dependence of the resistance of E78KhSF steel to plastic deformation on the degree of deformation that indicates the occurrence of dynamic recrystallization in addition to the dynamic recovery and polygonize. Analysis of the chemical composition of E78KhSF steel influence on the resistance to plastic deformation indicates an increase of this characteristic by increasing the concentration in the steel of carbon, manganese, sulfur and phosphorus, and decrease in resistance to plastic deformation by increasing the vanadium content in the steel. The obtained data on the absence of influence of the change in the concentration of silicon and chromium (within the interval of variation meeting the requirements of standards) on the resistance to plastic deformation of E78KhSF steel make it possible to draw a conclusion about the possibility of using the developed calculation technique for determining plastic deformation resistance of rail steels not alloyed by these elements. The adequacy of the proposed method was confirmed by studies of power parameters of

rolling at the existing universal rolling mill of JSC “EVRAZ ZSMK” for steels with different chemical composition.

Keywords: energy-power parameters of rolling, resistance to deformation, rail steel, experimental studies, thermomechanical rolling parameters, chemical composition of steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-10-804-810

REFERENCES

1. Kalpin Yu.G., Perfilov V.I., Petrov P.A., Ryabov V.A. etc. *Soprotivlenie deformatsii i plastichnost' metallov pri obrabotke davleniem* [Resistance to deformation and plasticity of metals at forming]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 244 p. (In Russ.).
2. Peretyat'ko V.N., Temlyantsev M.V., Filippova M.V. *Plastichnost' i razrushenie spлавov v protsessakh nagreva i obrabotki davleniem* [Plasticity and fracture of alloys in heating and forming processes]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 352 p. (In Russ.).
3. Zyuzin V.I., Brovman M.Ya., Mel'nikov A.F. *Soprotivlenie deformatsii stalei pri goryachei prokatke* [Steel resistance to deformation during hot rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 270 p. (In Russ.).
4. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 688 p. (In Russ.).
5. Ostapenko A.L., Rudenko E.A., Kurdyukova L.A. Evaluation of influence of determination technique of deformation resistance on calculation inaccuracy of strips and sheets hot rolling force. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”*. 2013, no. 6, pp. 38–44. (In Russ.).
6. Karpov S.V., Banshchikov A.A., Karpova A.S. Manganese steels resistance to deformation. *Polzunovskii al'manakh*. 2008, no. 3, pp. 123–126. (In Russ.).
7. Ostapenko A.L., Perekhodchenko V.A., Kushnir O.N., Plastun D.A. On applicability of methods of deformation resistance calculation for estimation of energy-force conditions for strips hot rolling. *Stal'*. 2014, no. 5, pp. 41–52. (In Russ.).
8. Kononov A.V. Viscoplastic model for the resistance of metals to high-temperature deformation. *Russian metallurgy (Metally)*. 2005, vol. 2005, no. 5, pp. 456–459.
9. Hildenbrand A., Molinari A., Baczyński J. Self-consistent poly crystal modelling of dynamic recrystallization during the shear deformation of A Ti IF steel. *Acta mater.* 1999, vol. 47, no. 2, pp. 447–460.
10. Marx E. Simulation of primary recrystallization. *Acta mater.* 1999, vol. 47, no. 4, pp. 1219–1230.
11. Manonukul A., Dunne N. Dynamic recrystallization. *Acta mater.* 1999, vol. 47, no. 7, pp. 4339–4354.

12. Ding R., Guo Z. X. Microstructural modeling of dynamic recrystallization using an extended cellular automaton approach. *Computational Materials Science*. 2002, no. 23, pp. 209–218.
 13. Goetz R.L., Seetharaman V. Modeling dynamic recrystallization using cellular automata. *Scripta Materialia*. 1998, vol. 38, no. 3, pp. 405–413.
 14. Gladkovskii S.V., Potapov A.I., Lepikhin S.V. Investigation of deformation resistance of EP 679 maraging steel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015, Issue 4, pp. 18–28.
 15. Konovalov A.V., Smirnov A.S., Parshin V.S., Dronov A.I., Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Fedulov A.A., Serebryakov A.V. Study of the Resistance of Steels 18KhMFB And 18Kh3MFB to Hot Deformation. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11, pp. 1118–1121.
 16. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viscoplastic model for the strain resistance of 08KH18N10T steel at a hot-deformation temperature. *Russian metallurgy (Metally)*. 2008, vol. 2008, no. 2, pp. 138–141.
 17. Potapov A.I., Batueva E.A. Resistance to deformation of silicomanganese steels for reinforcement. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2013, no. 10, pp. 38–40. (In Russ.).
 18. Golovatenko A.V., Dorofeev V.V., Trusov V.A., Volkov K.V., Dobryanskii A.V. Analysis of experimental dependence of rail steel E78KhSF Deformation resistance on deformation temperature, rate, and degree. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 528–534.
 19. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N. Investigation of rail steel chemical composition influence on resistance to deformation during rolling. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2015, vol. 35, pp. 52–59. (In Russ.).
 20. Umansky A.A., Golovatenko A.V., Kadykov V.N., Dumova L.V. Development of mathematical models and methods for calculation of rail steel deformation resistance of various chemical composition. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 12–29.
 21. Queen H.J., Jonas J.J. *Plastic deformation of materials*. New York: Academic Press, 1975, 493 p.
 22. *The hot deformation of Austenite*. Balance J.B. ed. New York: AIME, 1977, 631 p.
 23. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov* [Metals and alloys resistance to plastic deformation]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p. (In Russ.).
 24. Golovatenko A.V., Umansky A.A., Kadykov V.N. Improvement of rolling modes of long length rails on the universal rail and structural steel mill “EVRAZ ZSMK”. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 12–28. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was performed at the Siberian State Industrial University in the framework of basic part of the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation no. 11.6365.2017/8.9.
- Information about the authors:**
- A.A. Umanskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (umanskii@bk.ru)
- A.V. Golovatenko**, Cand. Sci. (Eng.), Head of Rail Production (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)
- V.N. Kadykov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science”. EVRAZ ZSMK (kadykov_vn@mail.ru)

Received March 14, 2017