

ФГБОУ ВПО

Череповецкий государственный университет

УДК 621.771.01

На правах рукописи

Ягудин Игорь Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ
В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ
СТАЛЬНЫХ ПОЛОС ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
СТАНОВ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д. т. н., профессор, Гарбер Э.А.

Череповец – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Аналитический обзор известных методов определения напряжений трения в очагах деформации станов холодной прокатки.	
1.1. Параметры, используемые для количественных характеристик процессов трения.....	9
1.2. Методы экспериментального определения напряжений трения и коэффициента трения.....	11
1.2.1. Метод принудительного торможения полосы.....	11
1.2.2. Метод крутящего момента.....	16
1.2.3. Комбинированный метод.....	18
1.2.4. Метод предельного обжатия.....	19
1.2.5. Метод опережения.....	22
1.2.6. Метод давления.....	25
1.2.7. Другие методы определения коэффициента трения.....	26
1.3. Анализ известных формул расчёта для коэффициента трения.....	27
1.4. Анализ известных из физики моделей трения при контактном взаимодействии твердых тел.....	31
1.5. Факторы, влияющие на коэффициент трения в контакте полосы и валков при холодной прокатке.....	38
1.5.1. Влияние состояния поверхности валка и полосы.....	38
1.5.2. Влияние скорости прокатки.....	39
1.5.3. Влияние контактного давления.....	40
1.5.4. Влияние обжатия.....	40
1.5.5. Влияние смазочных материалов.....	41
Выводы по главе 1.....	42
Глава 2. Новый метод определения коэффициентов трения в очагах деформации рабочих клеток стана холодной прокатки.	
2.1. Требования к новому методу определения коэффициента трения.....	43

2.2.Разработка метода определения коэффициентов трения, отвечающего требованиям, сформулированным в п.2.1.....	44
Выводы по главе 2.....	50
Глава 3. Разработка новой математической модели коэффициента трения в очаге деформации.	
3.1.Статистическая обработка массива значений коэффициентов трения в очаге деформации, полученных из базы данных АСУТП действующего стана.....	52
3.2. Анализ полученного регрессионного уравнения: выявление зависимостей коэффициента трения от параметров, влияющих на его величину.....	58
Выводы по главе 3.....	64
Глава 4. Использование новой регрессионной модели коэффициента трения для расчета энергосиловых параметров широкополосных станов холодной прокатки.	
4.1. Расчет усилия прокатки.....	66
4.2. Расчет мощности главного привода.....	68
Выводы по главе 4.....	75
Глава 5. Использование новой регрессионной модели коэффициента трения для совершенствования режимов холодной прокатки.	
5.1. Методика оптимизации технологических режимов на многоклетевом стане холодной прокатки.....	76
5.2.Оптимизация технологического режима напятиклетевом стане холодной прокатки «1700».....	78
Выводы по главе 5.....	83
Заключение (общие выводы по диссертации).....	84
Литература.....	86
Приложение. Базы данных пятиклетевого стана холодной прокатки «1700» ОАО«Северсталь».....	91

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

В последние годы повысились требования со стороны потребителей, в первую очередь – автомобилестроителей, к точности размеров и плоскостности холоднокатаных полос. Это потребовало повышения точности настройки станов, для чего необходимо минимизировать погрешности их энергосилового расчёта, которые, в свою очередь, зависят от использования достоверных моделей напряжений и коэффициента трения в очаге деформации. Характер изменения напряжений трения по длине очага деформации влияет не только на точность полос, но и на положение нейтрального сечения, от которого, зависят качество поверхности готового проката и затраты энергии на пластическую деформацию металла.

Напряжения трения в очаге деформации при холодной прокатке принято определять с использованием коэффициента трения скольжения по закону Амонта, в зависимости от величины нормальных контактных напряжений.

Большинство известных публикаций отечественных и зарубежных учёных об исследованиях коэффициентов трения в очагах деформации станов холодной прокатки (А.П. Грудев, В.К. Белосевич, А.К. Чертавских, Е.С. Рокотян, R.V. Sims, D.F. Arthur, M. D. Stone и др.) относятся к 40^м-80^м годам 20 века. Авторы монографий и учебников по теории прокатки, опубликованных в первом десятилетии 21 века, (В.А. Николаев (2002г.), Г.С. Никитин (2009г.), Я.Д. Василёв и А.А. Минаев (2010г.)) не приводят каких-либо новых данных об исследованиях коэффициентов и напряжений трения, кроме ссылок на упомянутые выше публикации

Выполненный нами анализ этих публикаций показал, что приводимые в них данные о значениях коэффициентов трения при холодной прокатке подчас противоречивы, а технологические и конструктивные параметры, при которых определялись эти коэффициенты, не соответствуют параметрам и условиям работы современных станов. Это вызвано двумя причинами. Во-первых, за последние 15-20 лет произошли существенные изменения в сортаменте,

конструкции и технологии станов холодной прокатки, появились новые марки стали, изменились режимы прокатки, состав и способы подачи на валки смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), технология подготовки поверхности валков. Во-вторых, в большинстве известных методов определения коэффициентов трения предусмотрены специальные эксперименты, выполняемые либо на лабораторных моделях, либо на действующих станах с использованием опытных образцов металла, т.е. не при рабочих режимах прокатки.

В то же время, согласно результатам исследований упомянутых выше учёных, величина коэффициента трения существенно зависит от таких технологических и энергосиловых параметров процесса прокатки, как обжатия, скорости, микрогеометрия поверхности полосы и валков, сила прокатки, смазывающие свойства СОЖ. Следовательно, значения коэффициентов, полученные по эмпирическим зависимостям в 40^х-80^х годах 20 века, не могут соответствовать реальным величинам коэффициентов контактного трения в очагах деформации современных широкополосных станов.

Опыт энергосиловых и технологических расчётов ряда действующих станов холодной прокатки, выполнявшихся в 2000-2012 гг. учёными Череповецкого государственного университета, подтвердил этот вывод: при использовании величин коэффициентов трения, вычисленных по известным методикам, погрешности определения сил прокатки достигают 35-40%, мощности прокатки до 25-30%. Это обстоятельство затрудняет разработку эффективных режимов прокатки и оптимизацию конструктивных параметров станов.

Таким образом, научно-техническая задача разработки расчётной модели коэффициентов трения, пригодной для использования на современных широкополосных станах, приобрела большую актуальность.

Целью работы является повышение точности расчета энергосиловых и технологических параметров широкополосных станов холодной прокатки за счет использования в этих расчетах более достоверных значений коэффициента трения между полосой и валками в очаге деформации, для совершенствования технологических режимов этих станов.

Задачи работы.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Анализ известных методов определения параметров трения в очаге деформации.
2. Разработка новой методики определения значений коэффициентов трения в очагах деформации рабочих клетей широкополосных станов, не требующей изменения их технологических режимов.
3. Разработка новой, статистически достоверной модели коэффициента трения, основанной на реальных диапазонах технологических параметров современных станов.
4. Проверка достоверности и практической значимости разработанной модели.

Методы исследования: для решения поставленных в работе задач использовались теоретические основы трибологии, современные методы теории прокатки; методы статистической обработки информации; методы цифровой обработки информации; методы математического моделирования.

Объект исследования: напряжения трения в очаге деформации в рабочих клетях станов холодной прокатки.

Предмет исследования: методы определения, расчёта и моделирования напряжений трения в очагах деформации широкополосных станов холодной прокатки.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту.

1. Разработан новый метод определения коэффициента трения в очагах деформации станов холодной прокатки, отличающийся от известных тем, что по данным АСУТП формируется представительный массив взаимосвязанных технологических и энергосиловых параметров действующего стана по всему спектру сортамента без вмешательства в технологический процесс, рассчитываются для каждого марко-профиля размера сортамента значения коэффициентов трения с использованием модели взаимосвязанных технологических и энергосиловых параметров, затем полученный массив

значений коэффициентов трения обрабатывается методами регрессионного анализа.

2. Получена новая регрессионная математическая модель коэффициента трения в очаге деформации, пригодная для использования в энергосиловых и технологических расчётах современных станов холодной прокатки, основное отличие которой от известных моделей состоит в том, что в ней достоверно учитывается зависимость коэффициента трения от предела текучести прокатываемой полосы, изменяющегося в результате наклёпа.

3. Для условий холодной прокатки впервые установлено, что с ростом предела текучести полосы коэффициент трения существенно снижается, а с ростом частного обжатия он также несколько снижается, что объясняется уменьшением высоты микронеровностей полосы под воздействием увеличивающегося контактного давления.

4. Установлено, что с ростом скорости прокатки коэффициент трения растёт во всём диапазоне изменения скоростей, что существенно корректирует известные из прежних исследований представления о влиянии скорости прокатки на коэффициент трения.

Практическая ценность результатов работы.

Полученное новое статистически достоверное регрессионное уравнение для вычисления величины коэффициента трения, впервые учитывающее влияние предела текучести материала прокатываемой полосы, позволило снизить погрешность энергосиловых расчетов более, чем в 2 раза и тем самым дало возможность уменьшить расход электроэнергии на действующих станах и в перспективе - капитальные затраты при проектировании новых станов

Достоверность результатов работы.

Достоверность нового метода определения коэффициента трения и полученной регрессионной модели для его вычисления подтверждена путём выполнения требований, предъявляемых к критериям оценки достоверности регрессионных зависимостей, принятых в математической статистике. Достоверность значений коэффициентов трения, полученных с применением

новой регрессионной зависимости, проверена на действующем стане холодной прокатки путём сопоставления рассчитанных и фактических усилий прокатки и мощностей двигателей рабочих клетей на статистически значимом массиве данных.

Реализация результатов работы.

Новая регрессионная модель коэффициента трения была использована при оптимизации технологических режимов действующего стана холодной прокатки. Она позволила более точно определять экономию электроэнергии при проведении промышленных испытаний.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, июнь 2009 г.), на Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, октябрь 2009 г.).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 2 монографии и 7 статей, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Работа выполнялась в Череповецком государственном университете в 2007-2014 гг.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 50 наименований и 1 приложения, содержит 115 страниц текста, 19 рисунков, 13 таблиц.

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕНИЯ В ОЧАГАХ ДЕФОРМАЦИИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

1.1. Параметры, используемые для количественных характеристик процессов трения

Непосредственными характеристиками интенсивности процесса трения а очаге деформации листового стана являются касательные контактные напряжения τ_x , по физическому смыслу являющиеся напряжениями трения первого рода, возникающими на поверхностях полосы и валков. В работе [1], излагающей современную теорию листовой прокатки, доказано, что в очагах деформации станов холодной прокатки на всей протяжённости дуги контакта полосы и валков, кроме нейтрального сечения, разность $(v_B - v_{x \text{ пов}}) \neq 0$, где v_B – окружная скорость бочки валка; $v_{x \text{ пов}}$ – переменная скорость поверхности полосы в точке с координатой «х» по длине очага деформации. Это значит, что, в отличие от очагов деформации станов горячей прокатки, при холодной прокатке зоны прилипания, в которых действует равенство $v_B = v_{x \text{ пов}}$, характерное для трения покоя, отсутствуют. Следовательно, при холодной прокатке касательные контактные напряжения подчиняются законам трения скольжения. Наиболее широко применяется в расчетах процессов холодной прокатки один из законов трения скольжения – закон Амонтона:

$$\begin{aligned} \tau_x &= \mu \cdot p_x \\ \tau_{\text{ср}} &= \mu \cdot p_{\text{ср}} \end{aligned} \quad (1.1)$$

где τ_x и p_x – переменные значения касательных и нормальных напряжений по длине очага деформации (по оси «х»); $\tau_{\text{ср}}$ и $p_{\text{ср}}$ - средние для очага деформации значения τ_x и p_x ; μ - коэффициент трения, по физическому смыслу – коэффициент пропорциональности между нормальными и касательными напряжениями, значение которого в подавляющем большинстве энергосиловых расчётов принимают средним для очага деформации.

В классической физике различают три разновидности трения скольжения: сухое, жидкостное и граничное (его называют ещё полужидкостным).

В очагах деформации промышленных станов холодной прокатки, за исключением станов, прокатывающих тончайшую ленту на зеркально полированных валках, имеет место граничное трение [1,2,3], характеризуемое тем, что находящийся между полосой и валками слой смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) не является сплошным: часть элементов поверхностей валков и полосы соприкасаются. Количество таких элементов зависит от шероховатости поверхности валков, характеризуемой средней высотой макронеровностей R_a : чем больше R_a , тем больше доля площади контакта, на которой имеют место соприкосновения элементов поверхностей полосы и валков.

Как правило, при выполнении энергосиловых расчётов станов холодной прокатки рассчитывают контактные напряжения τ_x , p_x , τ_{cp} , p_{cp} , а значения коэффициента трения μ задают в качестве исходных данных в виде эмпирической функции от параметров технологического режима: относительного обжатия ε , скорости прокатки v , высоты микронеровностей валков $R_{ав}$ (иногда – и полосы $R_{ап}$), кинематической вязкости применяемой СОЖ ν_{50} :

$$\mu = \mu(\varepsilon, v, R_a, \nu_{50}) \quad (1.2)$$

Для получения зависимостей (1.2) разработано около 20 различных методов экспериментальных исследований, аналитический обзор которых изложен ниже.

Некоторые авторы, например, В.К. Белосевич [4], предлагают характеризовать параметры контактного трения при холодной прокатке вместо выражения (1.1) на основе закона Кулона:

$$\begin{aligned} \tau_x &= a + \mu^1 \cdot p_x \\ \tau_{cp} &= a + \mu^1 \cdot p_{cp}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где a – удельное сопротивление сдвигу, обусловленное молекулярным взаимодействием поверхностей; μ^1 – коэффициент трения в законе Кулона, отличный от коэффициента трения в законе Амонтона.

Однако этот метод не нашёл практического применения в конструкторских и технологических расчётах из-за трудностей определения величины a и факторов, от которых она зависит.

Поэтому в данной диссертации за основу определения параметров, характеризующих интенсивность контактного трения в очагах деформации станов холодной прокатки, приняты выражения (1.1) и (1.2), использующие закон трения Амонтона.

1.2. Методы экспериментального определения напряжений трения и коэффициента трения

1.2.1. Метод принудительного торможения полосы [5]

Данный метод заключается в том, что в процессе прокатки к полосе прикладывается постепенно увеличивающаяся тормозящая сила Q (рис. 1.1) до момента начала пробуксовки в валках. В момент начала пробуксовки фиксируются значения усилия прокатки P и силы Q . Далее решают уравнение равновесия нормальной силы N и силы трения T .

По горизонтальной оси:

$$2T\cos\psi - 2N\sin\psi - Q = 0, \quad (1.4)$$

где ψ – угол приложения равнодействующей силы.

По вертикальной оси:

$$P - N\cos\psi - T\sin\psi = 0. \quad (1.5)$$

Подставив в уравнения (1.4) и (1.5) выражение $T = \mu N$ авторы [5] получили:

$$2N(\mu\cos\psi - \sin\psi) - Q = 0 \quad (1.6)$$

$$P = N(\cos\psi + \mu\sin\psi) \quad (1.7)$$

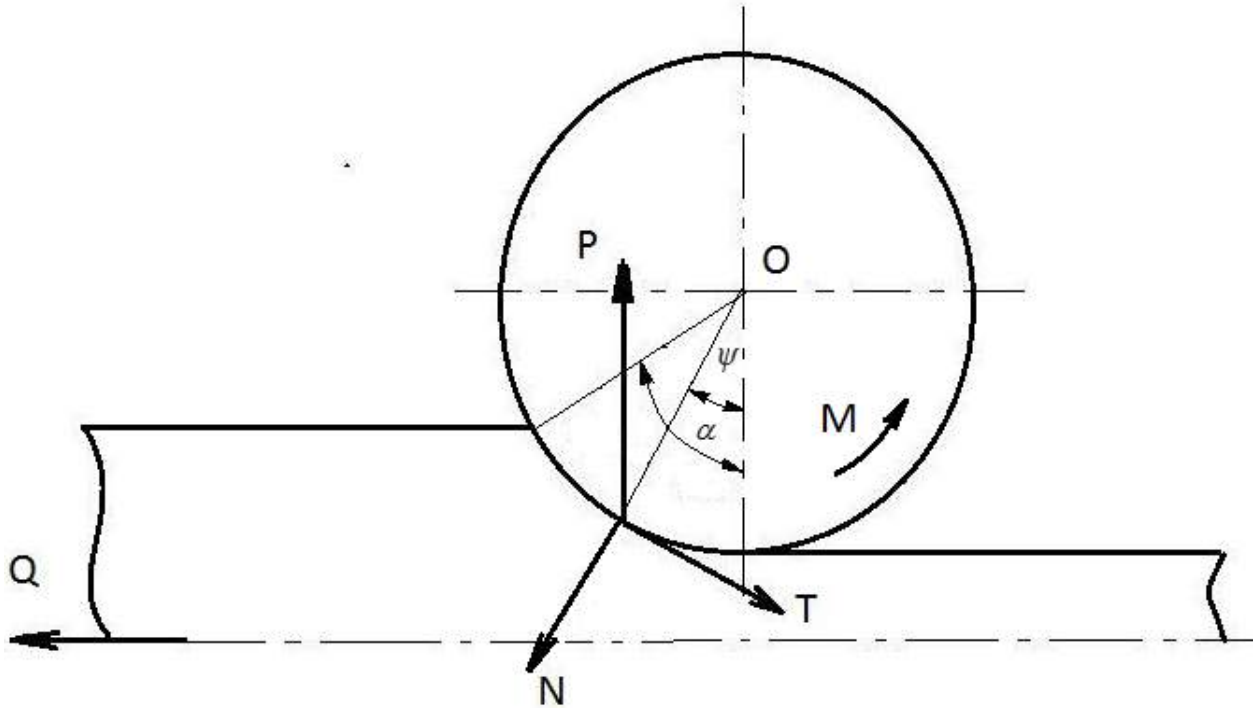


Рис. 1.1. Схема сил в методе принудительного торможения полосы. (Q – Сила торможения полосы; P – усилие прокатки; T – сила трения; N – нормальная сила; M – момент прокатки; α – угол захвата; ψ - угол приложения равнодействующей сил).

Решение системы уравнений (1.6) и (1.7), даёт формулу для определения коэффициента трения:

$$\mu = \frac{\frac{Q}{2P} + \operatorname{tg} \psi}{1 - \frac{Q}{2P} \operatorname{tg} \psi} \quad (1.8)$$

После несложных преобразований формулы (1.8) можно найти угол трения в очаге деформации:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{Q}{2P} + \psi \quad (1.9)$$

(под углом трения понимают угол, тангенс которого равен коэффициенту трения).

Автор [5] упрощённо принял, что точка приложения сил N и T находится посередине дуги контакта, т. е. $\psi = \alpha/2$. При этом допущении формулы (1.8) и (1.9) принимают вид

$$\mu = \frac{\frac{Q}{2P} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \frac{Q}{2P} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (1.10)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{Q}{2P} + \frac{\alpha}{2} \quad (1.11)$$

Помимо величины μ , методом принудительного торможения можно определить среднее значение напряжения трения τ_{cp} на контактной поверхности. Решая совместно уравнения (1.4) и (1.5), находим

$$T = P \sin \psi + \frac{Q}{2} \cos \psi. \quad (1.12)$$

Если принять $\psi = \alpha/2$, то

$$T = P \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{Q}{2} \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (1.13)$$

Среднее значение напряжения трения

$$\tau_{cp} = \frac{T}{b_{cp} \cdot l_c}, \quad (1.14)$$

где b_{cp} – среднее значение ширины полосы (при отсутствии уширения $b_{cp} = b = \text{const}$);

l_c – длина очага деформации с учётом упругого сплющивания валков и полосы.

Один из вариантов исполнения прибора для реализации метода торможения полосы показан на рис. 1.2. Прибор состоит из неподвижного упора 5, закреплённого на переднем столе прокатного стана, подвижной штанги 4 с захватом 2 для крепления образца 1, амортизационной пружины 6 и упорной

гайки 7. Переходным звеном между захватом 2 и штангой 4 служит трубчатый элемент 3, являющийся месдозой для измерения усилия торможения.

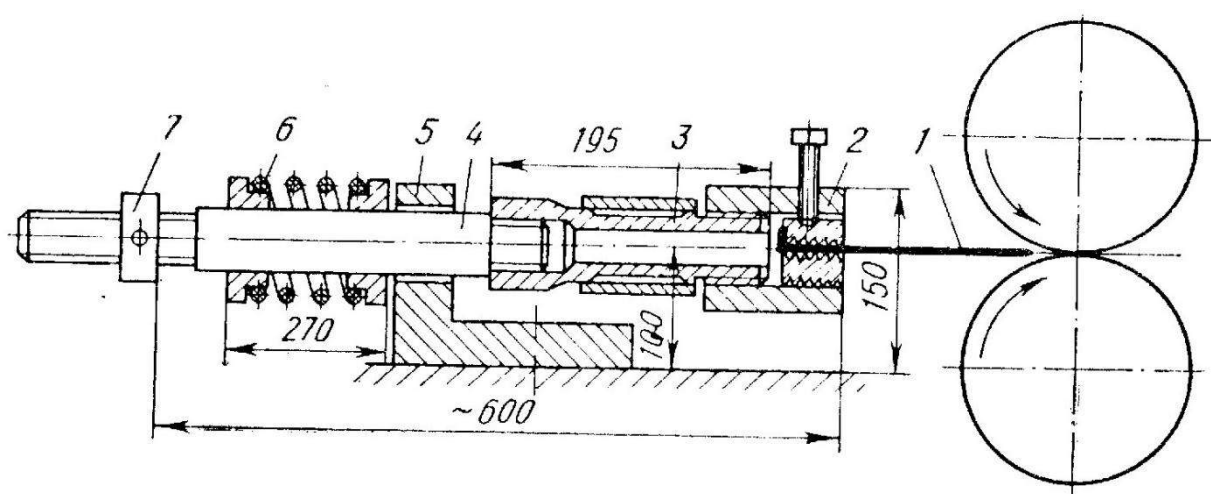


Рис.1.2. Схема прибора для торможения полосы.

Прибор работает следующим образом. Образец 1 закрепляется плашками в захвате 2 и задаётся посредством движения вперёд штанги 4 в валки. При прокатке образец увлекает за собой штангу 4. До тех пор, пока гайка 7 не упрётся в торец амортизационной пружины, идёт свободная прокатка. Далее возникает заднее натяжение, возрастающее по мере сжатия пружины 6, вплоть до остановки образца во вращающихся валках.

Усилие прокатки измеряется двумя месдозами.

Чтобы условия трения сохранялись такими же, как при нормальной прокатке, силы Q и P необходимо измерять в начальный момент возникновения буксования. Поэтому в этих опытах необходимо применять малоинерционную самопишущую измерительную аппаратуру.

В процессе буксования валков по металлу условия трения резко изменяются. Об этом свидетельствует, в частности, образование наваров на поверхности валков, которое нередко наблюдается в опытах с торможением. В связи с этим измерение сил Q и P после более или менее длительного буксования может привести к грубым ошибкам в определении μ .

Отметим некоторые особенности обработки осциллограмм сил Q и P . Для примера рассмотрим типичные осциллограммы, полученные при исследовании коэффициента трения в условиях холодной прокатки (рис. 1.3).

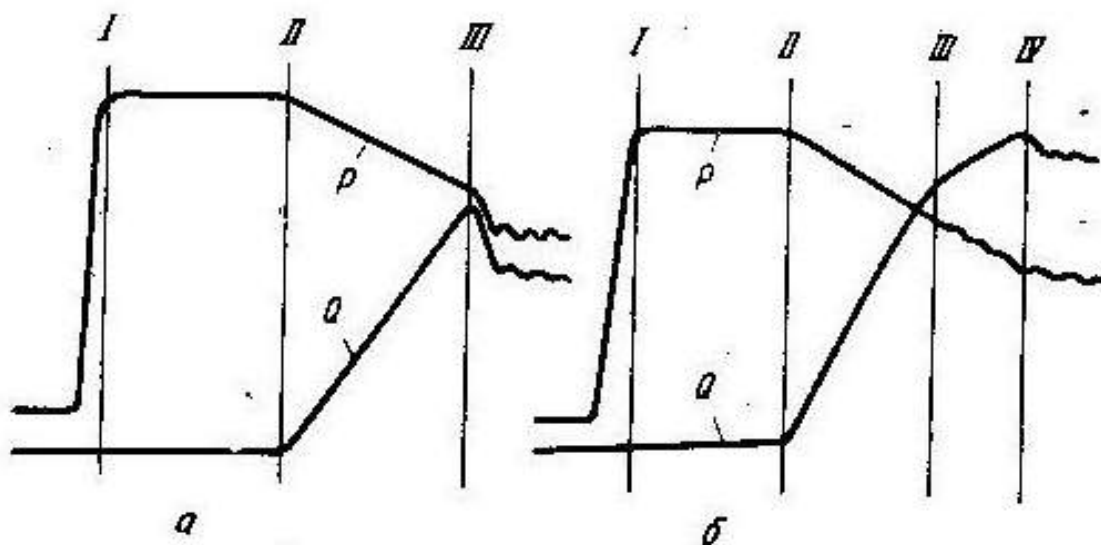


Рис.1.3. Осциллограммы процесса торможения.

Сечение I соответствует моменту захвата образца валками. На участке $I—II$ идет обычный процесс прокатки без заднего натяжения. В сечении II начинает действовать сила торможения Q . Она постепенно растет, и одновременно уменьшается усилие прокатки P . В сечении III сила Q достигает предельной величины (рис.1.3,а); далее происходит срыв валков относительно поверхности образца, т. е. возникает буксование. Очевидно, при расчете коэффициента трения следует брать значения сил Q и P в сечении III .

На осциллограммах типа a момент начала буксования выявляется очень четко по скачкообразному падению сил Q и P (иногда сила Q уменьшается мало). Более трудны для обработки осциллограмма типа $б$. Они отличаются тем, что на кривой силы Q имеется более или менее явно выраженный перегиб (сечение III), после чего сила Q продолжает расти, хотя и медленно (участок $III—IV$). Она достигает предельной величины в сечении IV .

Уменьшение крутизны подъема линии Q на участке $III—IV$ означает, что образец продвигается через валки с пониженной скоростью, с непрерывным проскальзыванием. Иногда сила Q на участке $III—IV$ претерпевает значительные

колебания, что само по себе свидетельствует о пробуксовках. Следовательно, и в этом случае для расчета коэффициента трения следует принимать значения сил Q и P , соответствующие сечению III.

Для более точного выявления момента возникновения сплошного однозначного скольжения целесообразно вести непрерывную регистрацию изменения скорости движения образца в процессе торможения. Однако это усложняет проведение экспериментов.

Недостатком метода принудительного торможения является допущение $\psi = \alpha/2$, снижающее достоверность рассчитанной по формуле (1.10) величины физического коэффициента трения в очаге деформации. На получаемых осциллограммах момент пробуксовки может быть выражен неявно, поэтому их обработка на ЭВМ затруднительна, и при большом количестве экспериментальных данных очень трудоёмка. Необходимость установки устройства торможения полосы ограничивает применение метода только лабораторными станами.

1.2.2. Метод крутящего момента [6]

В этом методе измеряется «чистый» крутящий момент на бочке валка M (без учёта потерь на трение в подшипниках), параллельно определяется усилие прокатки P .

Измерения выполняются при наличии сплошного однозначного скольжения в очаге деформации. Последнее создается либо за счет приложения заднего натяжения, либо путем применения предельного обжатия.

Коэффициент трения вычисляют по формуле

$$\mu = \frac{M}{PR}, \quad (1.15)$$

R – радиус бочки рабочих валков.

Расчетная формула (1.15) является несколько приближенной. Более строгой следует признать формулу

$$\mu = \frac{M}{R_T N} \quad (1.16)$$

где R_T — расстояние от центра вала O до точки приложения силы T , которое по данным [9] не равно в общем случае R .

В работе [7] для определения коэффициента трения при холодной прокатке предложена формула, учитывающая сплющивание валков:

$$\mu = \left[1 + \left(1 - \frac{R}{R^{cn}} \right) \left(\frac{R P_0 \alpha}{2 M_0} - 1 \right) \right] \left(\frac{M}{R P} \right) \quad (1.17)$$

где R^{cn} — радиус сплюснутых валков;

P_0 и M_0 — соответственно усилие прокатки и крутящий момент при отсутствии заднего натяжения.

Нетрудно видеть, что при $R^{cn} = R$ формула (1.17) превращается в формулу (1.15).

Основная трудность в проведении опытов при реализации данного метода заключается в достаточно точном определении «чистого» крутящего момента на бочке вала. Момент измеряют, как правило, на шпинделях, передающих вращение валкам. С этой целью на шпиндели наклеивают проволочные датчики или применяют крутильные динамометры разных типов. Для определения крутящего момента на бочке необходимо из замеренного крутящего момента на шпинделе $M_{шп}$ вычесть момент сил трения в подшипниках $M_{m.n.}$:

$$M = M_{шп} - M_{m.n.}$$

Для определения $M_{m.n.}$ обычно поступают следующим образом. Валки смазывают маслом и во время холостого вращения прижимают их один к другому с различным усилием. Измеряя крутящий момент $M_{m.n.}$, получают кривую $M_{m.n.} = \varphi(P)$. Эту зависимость в дальнейшем используют для нахождения искомого момента M .

Для обеспечения однозначного скольжения на контактной поверхности при измерении M в большинстве случаев применяется заднее натяжение. При прокатке длинных полос оно создается с помощью двигателя разматывателя.

Практические трудности в применении метода связаны с измерением «чистого» крутящего момента на бочке вала и необходимостью применения на

шпинделях высокочувствительных датчиков. Это обстоятельство делает практически невозможным применение метода в условиях действующего промышленного стана с большими вибрациями, ударными нагрузками и возможностью попадания загрязняющих частиц и капель СОЖ на измерительную аппаратуру.

1.2.3. Комбинированный метод

Идея комбинированного метода основана на измерении усилия торможения Q и крутящего момента M , что, по мнению авторов [8], должно повысить достоверность найденных с его помощью значений коэффициентов трения.

Расчётную формулу для коэффициента трения в этом методе получают путём решения уравнения равновесия сил в продольном направлении (1.6) относительно нормальной силы, упрощённо принимая $\psi = \alpha/2$, что в общем случае неверно и заранее вносит погрешность в расчёты:

$$N = \frac{Q/2}{\mu \cos \psi - \sin \psi} = \frac{Q/2}{\mu \cos \frac{\alpha}{2} - \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1.18)$$

Далее значение N подставляется в формулу (1.16). Величина R_T , входящая в (1.16) является расстоянием от центра вала O до точки приложения силы T , которая по данным автора [9] лежит вне дуги контакта. Согласно [9], R_T приближённо составляет

$$R_T = R \frac{\frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}$$

В результате из (1.16) получают

$$\mu = \frac{\frac{2M}{RQ} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{\frac{2M}{RQ} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} - 1} \quad (1.19)$$

Формулу (1.19) можно упростить, полагая $\frac{\sin \alpha}{\alpha} \approx 1$ и $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$:

$$\mu = \frac{\alpha M}{2M - RQ} \quad (1.20)$$

На первый же взгляд достоверность формулы (1.20) вызывает сомнения, т.к. размерность числителя (рад·Н·м) и знаменателя (Н·м) различны, а коэффициент трения безразмерная величина.

Комбинированный метод благодаря одновременному измерению величин P , Q и M должен был повысить достоверность полученных с его помощью значений коэффициента трения. Однако, по причине множества допущений и упрощений о геометрических параметрах в очаге деформации, расчётную формулу этого метода (1.20) нельзя считать достаточно надёжной для получения достоверных значений коэффициента трения.

1.2.4. Метод предельного обжатия [10]

В процессе прокатки образца тем или иным способом постепенно увеличивают обжатие и угол контакта. В определенный момент, когда возникает нехватка втягивающих сил трения, начинается буксование валков по металлу. Из равновесия сил в горизонтальном направлении получают (рис.1.4.):

$$T \cdot \cos\psi = N \cdot \sin\psi,$$

где T - сила трения между валком и полосой; N – нормальная сила; ψ — угол наклона равнодействующей нормальной силы.

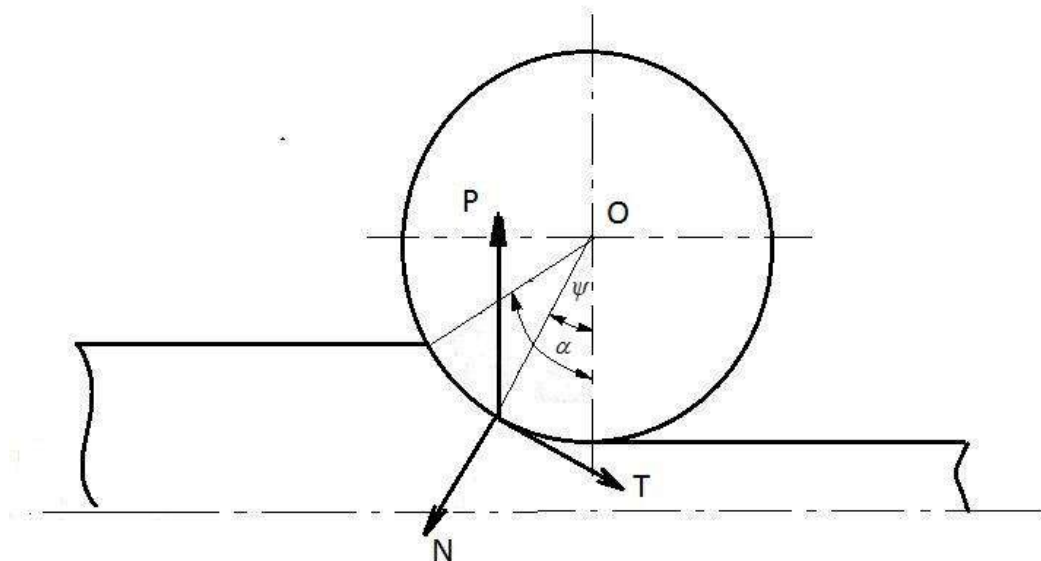


Рис.1.4. Схема сил при прокатке с предельным обжатием.

Откуда

$$\frac{T}{N} = tg\psi,$$

Т.к. T/N по закону Амонтона является коэффициентом трения, то по определению

$$\frac{T}{N} = tg\beta_y,$$

где β_y – угол трения.

Получаем

$$\psi = \beta_y \quad (1.21)$$

Практически всегда принимают $\psi = \alpha/2$, тогда (1.21) обращается в равенство

$$\alpha = 2\beta_y. \quad (1.22)$$

Максимальный угол контакта рассчитывают по формуле

$\alpha^m = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_\sigma}{D}\right)$, где Δh_σ - обжатие, при котором начинается буксование валков

по металлу; D – диаметр рабочих валков.

коэффициент трения вычисляют по формуле

$$\mu = tg \frac{\alpha^m}{2}. \quad (1.23)$$

Основным для оценки достоверности метода является вопрос о степени точности условия захвата (1.22).

Формула (1.22) выводится из уравнения равновесия продольных сил в очаге деформации при следующих предположениях:

- 1) равнодействующая нормальных давлений N приложена посередине дуги контакта (рис. 1.4);
- 2) равнодействующая сил трения T пропорциональна равнодействующей N ; угол между силами N и T составляет 90° .

Для достижения максимальных углов контакта в опытах чаще всего применяют клиновидные или ступенчато-клиновидные образцы, задаваемые в валки тонким концом. Желательно, чтобы угол клиновидности был небольшим. По мере прокатки клиновидного образца обжатие непрерывно увеличивается, пока не наступает буксование. Однако наблюдения показывают, что переход от нормальной прокатки к полной остановке образца в валках часто бывает сложным. Окончательной остановке обычно предшествует серия предварительных кратковременных пробуксовок. По-видимому, в момент буксования силы трения возрастают, за счет чего образец продвигается на некоторое расстояние вперед. Затем следует новая пробуксовка.

Если при расчете коэффициента трения исходить из обжатия, которое соответствует полной остановке образца в валках, то полученные значения будут завышенными. Они будут относиться к процессу длительного скольжения валков по металлу.

Для более правильного определения коэффициента трения необходимо найти начальную высоту образца и обжатие в том месте, где произошла первая пробуксовка (следы на образце заметны). Решение этой задачи облегчается, если на боковую поверхность образца перед прокаткой нанести сетку вертикальных рисок.

Вместо клиновидных образцов можно прокатывать обычные прямоугольные образцы с заостренными передними концами при различной установке валков.

При холодной тонколистовой прокатке удобно применять образцы постоянной толщины, но переменной ширины [11]. Форма таких образцов

показана на рис. 1.5 (один из возможных вариантов). Образцы задают в валки широким концом. По мере прокатки образца в связи с уменьшением ширины усилие прокатки падает, «пружина» рабочей клетки уменьшается и соответственно растет обжатие. В определенный момент возникают пробуксовки.

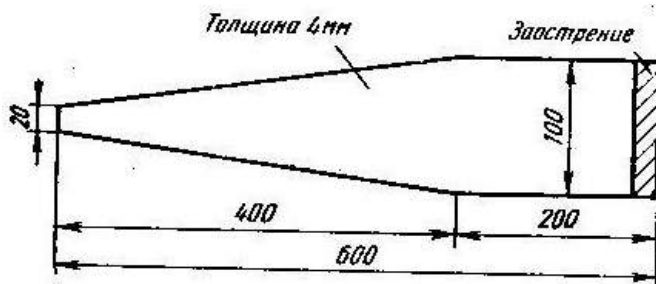


Рис.1.5. Образец переменной ширины для определения максимального угла контакта и коэффициента трения (вид сверху).

Формула (1.23), лежащая в основе определения коэффициента трения методом предельного обжатия, является приближенной, поэтому достоверные значения коэффициента трения с её помощью получить нельзя. Кроме того, применение метода на промышленных станах ограничивает необходимость получения пробуксовки, что не позволяет воспроизвести весь диапазон изменения параметров на промышленных станах.

1.2.5. Метод опережения [12]

При установившемся процессе прокатки измеряется величина коэффициента опережения S . Затем с помощью известных формул для коэффициента опережения, например, формулы Финка, находят величину нейтрального угла γ :

$$\cos \gamma = \frac{D + h_1}{2D} + \sqrt{\left(\frac{D + h_1}{2D}\right)^2 - \frac{h_1}{D}(1 + S)} \quad (1.24)$$

С этой же целью может быть использована упрощенная формула нейтрального угла:

$$\gamma = \sqrt{\frac{Sh_1}{R}} \quad (1.25)$$

Найденное таким образом значение угла γ подставляют в формулу Экелунда—Павлова, решенную относительно угла трения β_y :

$$\beta_y = \frac{\alpha^2}{2(\alpha - 2\gamma)} \quad (1.26)$$

Вполне понятно, что результаты определения коэффициента трения методом опережения зависят от точности основных расчетных формул (1.24) и (1.26).

Определяемый по формуле (1.24) угол γ характеризует вертикальное сечение, в котором средняя скорость металла равна окружной скорости валков. Но на контактной поверхности значение угла γ может отличаться от среднего. Вместе с тем в формулу (1.26) необходимо подставлять именно тот угол γ , который отвечает положению нейтральной точки на дуге контакта.

Отмеченный недостаток определения угла γ по формуле (1.24) особенно проявляется при малой величине параметра l_d/h_{cp} , когда неравномерность деформации металла выражена наиболее резко

Из изложенного следует, что формула (1.24) пригодна для определения угла γ на контактной поверхности только в условиях сравнительно равномерной деформации. Такие условия имеют место при больших значениях параметра l_d/h_{cp} .

Переходя к оценке точности формулы (1.26), необходимо отметить, что при выводе ее сделано допущение о пропорциональности между силами трения и нормальными давлениями на протяжении всей дуги контакта. Кроме того, принят ряд других серьезных допущений, подробно рассмотренных в литературе [13].

По существу вывода и по своей структуре формула (1.26) не допускает того, чтобы угол γ был больше $0,5\alpha$. Уже при $\gamma = 0,5\alpha$ знаменатель формулы (1.26) обращается в нуль, в связи с чем $\beta_y = \infty$. При $\gamma > 0,5\alpha$ расчетный угол β_y становится отрицательным.

Экспериментальные исследования показывают, что формула (1.24), как и (1.26), является более точной при больших значениях параметра l/h_{cp} [14].

Метод опережения дает достаточно надежные значения коэффициента трения при $l/h_{cp} > 3..4$ [15]. При более низких параметрах l/h_{cp} коэффициент трения получается завышенным.

Обычно величину коэффициента опережения определяют способом керновых отпечатков. Способ очень прост. С помощью керна или другого инструмента на поверхность валка наносят две отметки (лунки, риски), расстояние между которыми измеряют. После прокатки измеряют расстояние между соответствующими отпечатками на поверхности полосы. Коэффициент опережения составляет

$$S = \frac{l_{II} - l_e}{l_e} \quad (1.27)$$

где l_e — расстояние между отметками на валке;

l_{II} — расстояние между отпечатками на полосе.

В случае прокатки полос, длина которых превышает длину окружности валков, достаточно иметь одну отметку на поверхности валка. Тогда $l_e = \pi D$ и формула (1.28) принимает вид

$$S = \frac{l_{II} - \pi D}{\pi D} \quad (1.28)$$

При горячей прокатке действительное расстояние между отпечатками на полосе при выходе ее из валков рассчитывают по формуле

$$l_{II} = l'_{II} (1 + \alpha_t \Delta t) \quad (1.29)$$

где l'_{II} — расстояние между отпечатками на холодной полосе;

α_t — коэффициент теплового расширения металла;

Δt — разность температур прокатки и окружающей среды.

Из изложенного видно, что определение коэффициента трения по опережению не требует применения специальных устройств и аппаратуры, а также образцов специальной формы. Именно этими практическими обстоятельствами объясняется широкое распространение метода.

Недостатком метода является то, что результаты опытов зависят от геометрических параметров очага деформации. Метод не применим на

промышленном оборудовании, т.к. требует для осуществления заранее подготовленных образцов с заранее нанесёнными на них отметками

1.2.6. Метод давления [16]

Сущность метода заключается в измерении усилия прокатки во время установившегося процесса прокатки. Далее подбирается такое значение μ , которое, при подстановке в одну из формул для усилия прокатки, обеспечивает совпадение опытных и расчетных величин P или $p_{ср}$.

Впервые такой метод исследования коэффициента трения при прокатке был применен Е. С. Рокотяном, который с этой целью использовал выведенную им формулу усилия прокатки [16].

Достоверность полученных таким путем значений μ зависит от погрешностей, которую обеспечивает используемая методика для расчёта усилия прокатки, а также от того, насколько правильно выбран подставляемый в нее предел текучести металла. В связи с этим необходимо отметить следующее:

- 1) современные методики расчёта энергосиловых параметров процесса холодной прокатки, в частности [1,2,3], учитывающие упругую составляющую при деформации полосы, позволяют вычислить усилие прокатки с погрешностью до 5%;
- 2) разработанные в последнее десятилетие методики [17] определения истинного предела текучести металла при холодной деформации в очаге деформации дают точность вычислений в 3-5%.

В большинстве случаев для измерения усилия прокатки применяются месдозы, помещаемые под нажимные винты.

Ввиду того, что предел текучести металла одной и той же марки колеблется в значительных пределах, желательно определять величину предела текучести не по справочным данным, а путем непосредственных механических испытаний прокатываемого материала.

При современном состоянии теории прокатки метод давления является надежным способом определения коэффициента трения. По причине того, что все современные прокатные станы оснащены средствами измерения и записи усилия прокатки на каждой клети, этот метод может быть реализован в промышленных условиях без установки какого-либо дополнительного оборудования или подготовки специальных образцов.

1.2.7. Другие методы определения коэффициента трения

Рассмотренными в предыдущих параграфах методами исследования коэффициента трения получено подавляющее большинство экспериментальных данных.

В более редких случаях применяются другие методы. Например, в отдельных работах [18, 19] исследование коэффициента трения проводили на основе измерений уширения металла при прокатке. Расчет, в этом случае ведется по одной из формул уширения, в частности по формуле Губкина [20]:

$$\Delta b = \frac{\Delta h}{h_0} \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right) \left(f_y \sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2}\right) \quad (1.30)$$

Преобразуя выражение (1.31), находим

$$\mu = \left[\frac{\Delta b}{\frac{\Delta h}{h_0} \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0}\right)} + \frac{\Delta h}{2} \right] \frac{1}{\sqrt{R\Delta h}} \quad (1.31)$$

Достоинством метода уширения является исключительная простота проведения экспериментов. Вместе с тем следует отметить, что зависимость уширения от коэффициента трения учитывается теоретическими формулами приближенно. Поэтому исследование факторов трения с помощью этих формул может привести к ошибочным выводам не только в количественном, но и в качественном отношении.

Анализ изложенных выше известных экспериментальных методов определения коэффициента трения, показал, что большинство из них не может быть использовано для достоверного определения сил трения в очаге деформации при холодной прокатке на современных широкополосных станах. Это обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, основная часть методов экспериментального определения коэффициента трения может быть реализована лишь на натуральных моделях в лабораторных условиях, где невозможно воспроизвести весь диапазон изменения рабочих параметров современных станов, таких, как скорость прокатки (до 30 м/с в последних клетях), уровень нормальных контактных напряжений (до 800-900 МПа). Во-вторых, способы, которые могут быть реализованы на промышленных станах, требуют переналадки оборудования с рабочих режимов на экспериментальные на достаточно длительное время, т.к. они основаны на прокатке значительного количества образцов специальной формы или с заранее нанесёнными метками на них, что приведет к значительным потерям производства.

Единственным методом экспериментального определения коэффициента трения, который можно использовать без нарушения отлаженного технологического режима, является метод давления, предложенный Рокотяном.

1.3. Анализ известных формул расчёта для коэффициента трения

В работе Р. Б. Симса и Д. Ф. Артура [21] зависимости коэффициента трения от скорости прокатки выражены формулами:

$$\mu = 10^{-3} e^{av^{-b}} \quad (1.32)$$

$$\mu = \mu_{ст} e^{-cv}, \quad (1.33)$$

где a , b и c — эмпирические константы;

$\mu_{ст}$ — коэффициент статического трения ($v=0$).

Формула (1.33) относится к интервалу скоростей менее 0,25 м/с, поэтому для использования на современных станах она непригодна

А. П. Грудев в работе [22] предложил рассчитывать коэффициент трения в виде следующей зависимости:

$$\mu = q_{um} q_{cm} q_v C, \quad (1.34)$$

$q_{um} = 1 + R_z$ - коэффициент, учитывающий шероховатость валков;

$$q_{cm} = K_{cm} \left(\frac{0.15}{\sqrt{\nu_{50}}} + 0.03 \right) - \text{коэффициент, учитывающий влияние вида смазки;}$$

$$q_v = 0.07 - \frac{0.1\nu^2}{2(1+\nu) + 3\nu^2} - \text{коэффициент, учитывающий скорость прокатки;}$$

C – константа.

После ряда аппроксимации и преобразований формулы (1.34) получено выражение

$$\mu = \frac{K_{cm}(1+0,5R_z)}{1+0,25\sqrt{\nu_{50}}-0,005\nu_{50}} \left[0,07 - \frac{0,1\nu^2}{2(1+\nu)+3\nu^2} \right], \quad (1.35)$$

где R_z - максимальная высота микронеровностей на поверхности бочки валка, мкм;

ν_{50} - кинематическая вязкость смазки при 50^0C , сСт ($\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-2}$);

ν – окружная скорость бочки валков, м/с.

Формула (1.35) справедлива при изменении вязкости ν_{50} в пределах 5-1000сСт и шероховатости R_z в пределах 0,2-10 мкм. Изменение скорости прокатки не ограничено. Коэффициент K_{cm} для растительных масел равен 1,0, для минеральных 1,4.

При задаче полосы с грубой поверхностью в гладкие полированные валки А.П. Грудевым предложена следующая дополнительная формула

$$\mu = (1 \div 1.5)\mu^1 + 0.007(R_{zn} - R_z) \times \left[1 - \frac{0.3\varepsilon}{1 - 0.2\sqrt{\varepsilon} + 0.25\varepsilon} \right], \quad (1.36)$$

μ^1 - коэффициент трения, рассчитанный по формуле (1.35);

R_{zn} - максимальная высота микронеровностей полосы;

ε – относительное обжатие.

На базе 4-х клетового стана «1700» холодной прокатки на заводе им. Ильича проводились исследования коэффициента трения под руководством П.И. Полухина [23]. Коэффициент трения определяли для четырех режимов прокатки полосы толщиной 1мм из стали 08кп. В качестве смазки использовалась эмульсия концентрацией 10-12%. Исследование проводили при прокатке рулонов с различными скоростными режимами. При установившемся процессе прокатки в один и тот же момент времени в каждой клетке непрерывного стана измеряли значения усилий, толщины, натяжения полосы и скорости прокатки. Значения коэффициента трения получали подбором так, чтобы совпали расчетные и экспериментальные значения полных усилий прокатки с определенной точностью.

Затем методом наименьших квадратов для всех клеток были построены эмпирические зависимости коэффициента трения от скорости прокатки:

$$\begin{aligned}\mu_{cp1} &= 0.363 - 0.027\nu + 0.0025\nu^2 \\ \mu_{cp2} &= 0.215 - 0.0282\lg \nu \\ \mu_{cp3} &= 0.1623 - 0.0056\nu + 0.00026\nu^2 \\ \mu_{cp4} &= 0.1076 - 0.0025\nu + 0.00012\nu^2\end{aligned}\tag{1.37}$$

Методика Стоуна

В зависимости от скорости прокатки в i -й клетке определяют коэффициент трения μ_i , используя график Стоуна [24]. Например, при смазке эмульсией минерального масла эти выражения имеют вид:

$$\begin{aligned}\text{при } \nu_i \leq 3,5 \text{ м/с} \\ \mu_i = 0,135 - 0,0154\nu_i;\end{aligned}\tag{1.38}$$

$$\begin{aligned}\text{при } 3,5 < \nu_i \leq 8,5 \text{ м/с} \\ \mu_i = (1,189\nu_i^2 - 20,89\nu_i + 137,93)10^{-3};\end{aligned}\tag{1.39}$$

$$\begin{aligned}\text{при } 8,5 < \nu_i \leq 16 \text{ м/с} \\ \mu_i = 0,00059\nu_i + 0,0482;\end{aligned}\tag{1.40}$$

при $v_i > 16$ м/с

$$\mu_i = 0,0576. \quad (1.41)$$

В формулах (1.37) - (1.41) коэффициент трения является функцией лишь одной переменной - скорости прокатки. В то же время такие факторы как шероховатость бочки валков, смазывающие свойства СОЖ, обжатия оказывают значительное влияние на силу трения в очаге деформации. Также нет понимания, как применять (1.37) для станов с количеством клетей, не равным четырём, т.к. скоростные режимы по клетям, очевидно, будут отличными от тех, что использовали при получении этих формул.

На базе пятиклетевого стана «1700» холодной прокатки ОАО «Северсталь» проводилась работа [25] по уточнению формулы Грудева (1.35). В результате были сделаны следующие выводы:

- 1) эмпирический коэффициент принять равным $k_{cm} = 1,3$;
- 2) шероховатость валков учитывать на основе не максимальной (R_z), а среднеарифметической высоты микронеровностей R_a ;
- 3) для расчета коэффициента трения на 1-й клетки учитывать также и шероховатость горячекатаного подката (принимать усредненное R_a для подката и бочки валков);
- 4) при использовании на последних клетях насеченных дробью рабочих валков учитывать шероховатость R_a с учетом фракций применяемой дроби;
- 5) кинематическую вязкость СОЖ ν_{50} принять равной 30 сСт, т.е. как у пальмового масла.

Формула (1.35) была модифицирована и представлена в виде

$$\mu_i = \frac{1 + (0,4 + 0,01\varepsilon_i)R_a}{1 + 0,25\sqrt{\nu_{50}} - 0,005\nu_{50}} \left[0,091 - \frac{0,13v_i^2}{2(1 + v_i) + 3v_i^2} \right] \quad (1.42)$$

Подводя итог обзору известных методов расчёта коэффициента трения в очаге деформации при холодной прокатке тонких полос, необходимо отметить, что формулы (1.32), (1.33), (1.37)-(1.41) учитывают только один фактор,

влияющий на трение – скорость прокатки, поэтому вряд ли могут быть использованы в энергосиловых расчётах современных станов.

Наиболее обоснованной для использования является модифицированная формула Грудева (1.42) – она учитывает основные существенные параметры процесса холодной прокатки. Однако это выражение было получено более 30 лет назад, в то время как за последние 10-20 лет в процессе холодной прокатки произошли значительные изменения, а именно:

1. Появились новые марки стали, в том числе со сверхнизким содержанием углерода;
2. Появились новые смазочно-охлаждающие жидкости;
3. Увеличилась доля наиболее тонких полос в сортаменте широкополосных станов;
4. Увеличились максимальные и средние рабочие скорости прокатки.

Кроме того, вывод расчётных формул коэффициента трения выполнялся всеми упомянутыми авторами без сопоставления их с моделями трения скольжения твердых тел, известных из физики. Это сопоставление необходимо, чтобы установить, все ли факторы, влияющие на коэффициент трения, были учтены в упомянутых работах.

1.4. Анализ известных из физики моделей трения при контактном взаимодействии твердых тел

Вопросы описания контактного трения между твердыми телами освещались во многих исследованиях [26,27,28,29,30] Наиболее широкое признание получила молекулярно-механическая теория трения профессора И. В. Крагельского. Расчетные формулы, приведенные в работах И. В. Крагельского и его учеников [31], позволяют определять основные параметры трения и изнашивания. Данные формулы для коэффициента трения были получены путем учёта параметров, характеризующих микрорельеф поверхностей трущихся тел, определение которым дано ниже.

Поверхности реальных тел не являются идеально ровными. В процессе технологической обработки машиностроительных материалов на их поверхности появляется микрорельеф – технологическая шероховатость. Различают два вида микроотклонений от идеальной поверхности: шероховатость и волнистость. При соприкосновении двух таких поверхностей контакт не будет сплошным: лишь отдельные участки поверхности будут воспринимать приложенную нагрузку. Сумма таких дискретных площадок образует фактическую площадь контакта (ФПК) [31]. ФПК определяет область силового взаимодействия двух тел, обусловленного межмолекулярным взаимодействием, поэтому расчет ФПК является одной из главных составных частей расчета на трение.

ФПК и действующая нагрузка связаны соотношением:

$$A_r = \text{const}N^n, \text{ где}$$

A_r - фактическая площадь контакта двух поверхностей;

N – нагрузка;

n - коэффициент, $n=1$ при пластическом контакте и весьма близок к 1 при упругом [32].

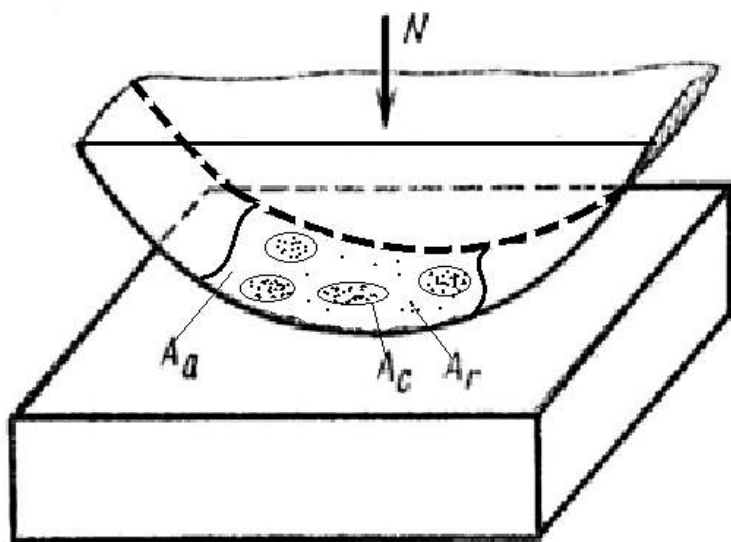


Рис.1.6. Рисунок, поясняющий понятия истинной, контурной и номинальной площадей.

Различают также контурную площадь A_c , в границах которой размещаются все отдельные элементарные микроконтакты, и номинальную площадь A_a ,

очерченную внешними границами соприкасающихся поверхностей. Смысл контурной и номинальной поверхностей поясняется на рис.1.6.

Для определения площадей A_r и A_c необходима информация о микрорельефе поверхности. Эту информацию возможно получить из профилограмм – графического изображения профиля поверхности (рис 1.7).

Основные характеристики поверхности, получаемые из профилограмм:

R_{max} - наибольшая высота микронеровностей профиля;

Средняя линия L – имеет форму номинального профиля и проведется так, что в пределах базовой длины среднеквадратичное отклонение профиля от этой линии минимально.

Опорная длина профиля η_p - сумма длин отрезков ΣL_i в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне p_i в материале профиля линией, параллельной средней. Относительная опорная длина $t_p = \frac{\eta_p}{L}$;

Опорная кривая профиля - графическое изображение зависимости относительной опорной длины профиля от уровня сечения p_i ;

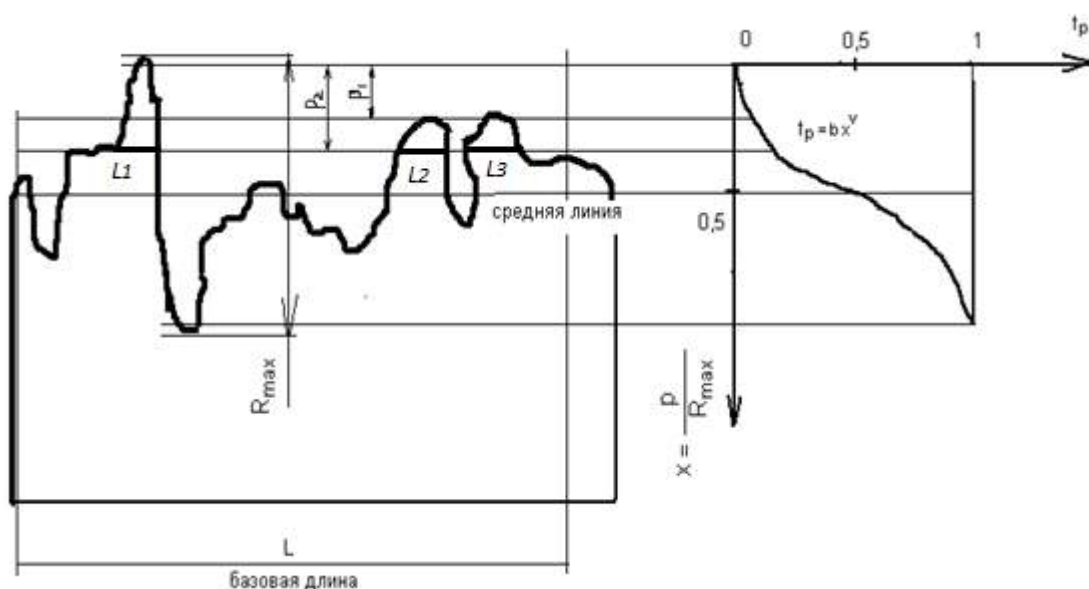


Рис.1.7. Профилограмма поверхности и опорная кривая профиля.

Если ординаты профиля подчиняются нормальному закону распределению, то, как показано в [32],

$$t_p = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{1-2x}{2\sigma} \right) \right],$$

где σ – стандартное (среднеквадратичное) отклонение профиля.

Эта функция на промежутке $(0;0,5)$ может быть аппроксимирована зависимостью вида:

$$t_p = bx^v,$$

где b и v – параметры аппроксимации.

Основные положения молекулярно-механической теории следующие:

- сила (коэффициент) трения является суммой двух составляющих – молекулярной и механической. Механическая составляющая силы трения при контакте единичной неровности с контртелом представляет собой сопротивление материала деформированию этой неровностью;
- фрикционный контакт, как правило, характеризуется наличием между твёрдыми телами промежуточного слоя, представляющего собой плёнку смазки, окисла, адсорбированных паров воды и плёнку деградированного материала основы. Эта прослойка имеет меньшее сдвиговое сопротивление, чем основной материал. Область, состоящую из плёнки и деградированного материала основы, называют третьим телом (рис 1.8);
- на свойства третьего тела оказывают влияние состояние поверхности, давление между телами, время контакта, скорость приложения нагрузки;
- при взаимном перемещении тел происходит разрушение и одновременно формирование третьего тела;
- давление оказывает значительное влияние на величину коэффициента трения. Следует различать силы сдвигового сопротивления, зависящие от нормального давления, и силы, не зависящие от него. Изменение коэффициента трения в зависимости от нормального давления обусловлено соотношением между этими силами;
- при возрастании скорости взаимного перемещения двух поверхностей сила трения изменяется. Обычно она переходит через максимум. При увеличении

давления максимум коэффициента трения смещается в область более низких скоростей скольжения.

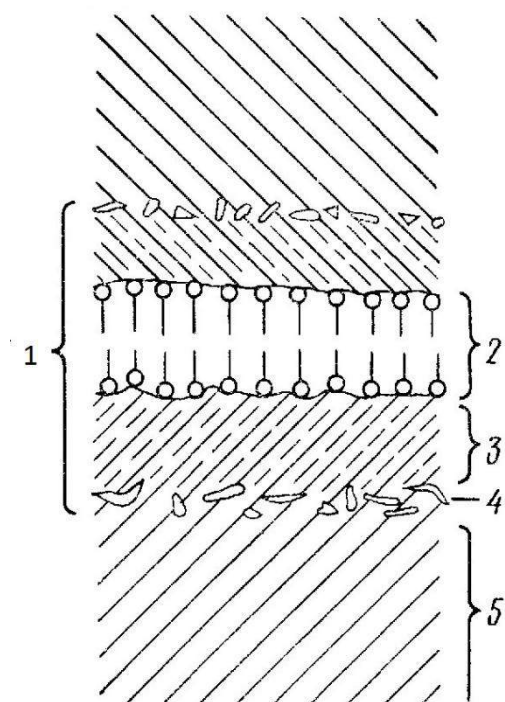


Рис.1.8. Схема контакта двух трущихся тел.

1- третье тело; 2 –адсорбированный слой; 3 – окислы и другие химические соединения; 4 – разрыхленный слой; 5 – основной материал взаимодействующих тел.

Процессы молекулярного взаимодействия ограничиваются «третьим телом», т.е. протекают в пленке и затрагивают поверхностные слои твердых тел на глубине порядка сотых микрометра. Процессы механического взаимодействия происходят в самом твердом теле в слоях порядка десятых микрометра. Различие уровней протекания процессов позволяет в первом приближении суммировать эти два сопротивления[31]:

$$\mu = \mu_a + \mu_m, (1.43)$$

где μ_m - механическая составляющая коэффициента трения;

μ_a молекулярная составляющая коэффициента трения:

$$\mu_a = \tau_0 + \beta p_r, \quad (1.44)$$

p_r - давление на фактической площади контакта;

τ_0 - сдвиговое сопротивление (для пары металл-металл $\tau_0=0,25-0,30$ кгс/мм² без смазки и $\tau_0=0,1$ кгс/мм² со смазкой);

β – пьезокоэффициент молекулярной составляющей силы трения $\beta=0,02-0,15$.

Механическая составляющая возрастает при увеличении шероховатости и росте нагрузки. Она тем больше, чем ярче выражены реологические свойства.

Для вывода формулы механической составляющей коэффициента трения принималась сферическая модель микронеровности, с радиусом кривизны r и глубиной внедрения h .

Механическая составляющая коэффициента трения для единичной неровности при пластическом контакте

$$\mu_{м,н} = \frac{0,31}{r} \left(\frac{N}{c \sigma_T} \right)^{0,5}. \quad (1.45)$$

При упругом контакте

$$\mu_{м,у} = 0,17 \alpha_r \frac{N^{1/3} \cdot \Theta^{1/3}}{r^{2/3}} = 0,44 \alpha_r \cdot p_r \Theta, \quad \Theta = \frac{1-\nu^2}{E} \quad (1.46)$$

ν - коэффициент Пуассона;

σ_T - предел текучести;

E – модуль упругости;

α_r – коэффициент гистерезисных потерь при скольжении. При скольжении сферы установлено, что $\alpha_r = 2,2\alpha$, α - коэффициент гистерезисных потерь для материала, определенный в экспериментах на одноосное сжатие-растяжение.

Для множественного контакта

$$\mu_{м,н} = \frac{T}{N} = 0,55 K_{\nu,f}^n \sqrt{\frac{h_{кин}}{r}} \quad (1.47)$$

$$\mu_{м,у} = 0,19 \alpha_r K_{\nu,f}^y \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} \cdot \left(\frac{2\sqrt{\pi}}{K_\nu} p_c \Theta \right)^{\frac{1}{2\nu+1}} \quad (1.48)$$

N - нагрузка;

c – коэффициент (безразмерный), зависящий от формы выступов и от упрочнения;

ν – параметр степенной аппроксимации кривой опорной поверхности;

$\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}}$ – безразмерный комплекс, характеризующий шероховатость поверхности;

b – параметр кривой опорной поверхности;

p_c – контурное давление.

Доля каждой составляющей коэффициента трения зависит от нагрузки, шероховатости, волнистости, механических свойств, молекулярных характеристик пары трения. Для приработанных металлических поверхностей при упругом контакте [31]:

$$\frac{\mu_a}{\mu_m} \approx 50 \div 100.$$

Доля механической составляющей увеличивается при пластическом контакте.

В зависимости от различных условий контакта в работе [31] приводятся различные формулы для коэффициента трения. Для нашей работы наиболее важным является случай, когда жёсткие шероховатости внедряются в пластическое полупространство:

$$\mu = \frac{\tau_0}{c\sigma_T} + \beta + 0,55K_\phi \Delta^{0,5} \left(\frac{2p_r}{c\sigma_T} \right)^{0,5\nu} \quad (1.49)$$

Несмотря на достаточно строго разработанный математический аппарат, воспользоваться предложенными формулами для расчёта коэффициента трения в очаге деформации станов холодной прокатки достаточно сложно. В них содержится большое количество трудно определяемых величин. Так, в работе [31], где описана изложенная теория, подчеркивается, что говорить сейчас об общей количественной теории молекулярного трения рано, тем более, что в зоне касания двух твердых тел формируется третье тело, свойства которого мало изучены.

Тем не менее, из выражений для коэффициента трения (1.45) - (1.49) можно извлечь информацию о наиболее существенных факторах, влияющих на его величину. Это предел текучести трущихся тел, давление на контактной

поверхности, продолжительность взаимодействия (скорость скольжения), шероховатость и рельеф поверхности, наличие других веществ на поверхности.

1.5. Факторы, влияющие на коэффициент трения в контакте полосы и валков при холодной прокатке

1.5.1. Влияние состояния поверхности валка и полосы

В работе [22] представлены результаты исследования влияния шероховатости поверхности валков и полосы на коэффициент трения. Опыты проводились на стане 180. Коэффициент трения измерялся методом принудительного торможения полосы при прокатке образцов из наклепанной стали 08кп начальной толщиной 0,5-0,6 мм. В качестве смазочной жидкости применялось касторовое масло и 5% эмульсию. Результаты исследования приведены на рис. 1.9.

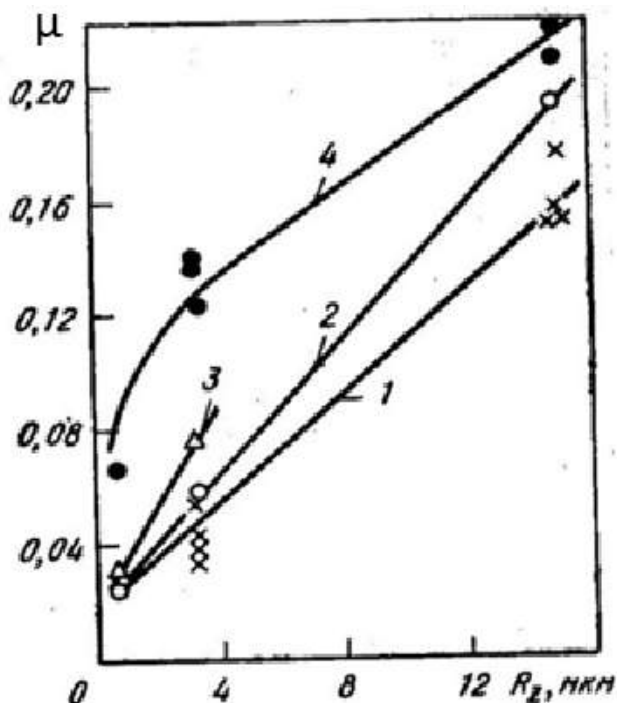


Рис.1.9. Зависимость коэффициента трения от шероховатости поверхности валков: 1,2,3- прокатка с касторовым маслом, обжатие 10, 25, 40% соответственно; 4- прокатка с эмульсией, обжатие 25%.

По результатам делаются следующие выводы:

- шероховатость поверхности валков существенно влияет на коэффициент трения: увеличение высоты микронеровностей вызывает повышение коэффициента трения; при прокатке с касторовым маслом зависимость коэффициента трения от шероховатости прямолинейная, а при прокатке с эмульсией – параболическая;
- увеличение обжатия усиливает влияние шероховатости;
- влияние шероховатости зависит от вида применяемой смазки.

1.5.2. Влияние скорости прокатки

В [22] говорится о снижении коэффициента трения с увеличением скорости прокатки, причем такое влияние наиболее существенно в диапазоне малых скоростей – до 5 м/с.

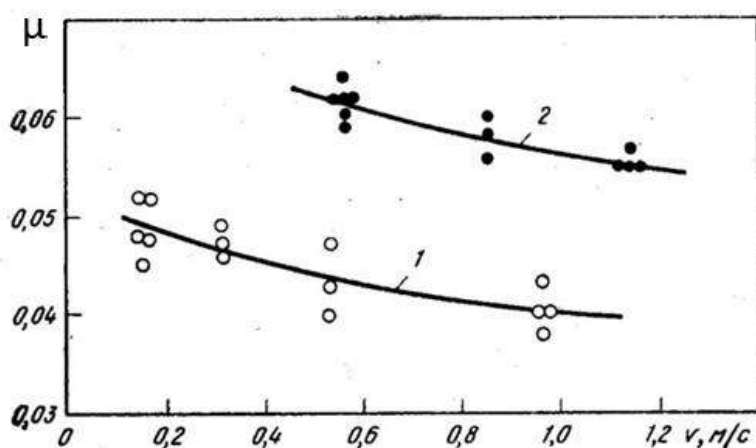


Рис.1.10. Зависимость коэффициента трения от скорости прокатки: 1- лабораторные опыты, прокатка с касторовым маслом; 2- производственные опыты, прокатка с эмульсией.

При прокатке со смазками такая зависимость объясняется увеличением объема захватываемой в очаг деформации жидкости, а, следовательно, и увеличением слоя смазки между инструментом и полосой и облегчением условий трения. При больших скоростях прокатки этот эффект теряет свою значимость, т.к. слой смазки может увеличиваться до определенных значений.

1.5.3. Влияние контактного давления

Действие давления на усилия трения обычно связывают с изменением фактической площади контакта между металлом и инструментом. В процессах обработки давлением фактическая площадь контакта близка ко всей площади. Если же с повышением давления число точек металлического контакта увеличивается, то и сила трения будет возрастать. Коэффициент трения при этом может как оставаться постоянным, так и изменяться в любую сторону. Если площадь металлического контакта растет медленнее нагрузки, то коэффициент трения падает и наоборот.

Основные случаи влияния давления на коэффициент трения при холодной прокатке таковы:

1. При прокатке на полированных валках с вязкой смазкой с увеличением контактного давления коэффициент трения повышается;
2. В случаях, когда коэффициент трения находится в диапазоне 0,04-0,06, он практически не зависит от давления.
3. В условиях грубошлифованных валков и недостаточного количества смазки коэффициент трения уменьшается с ростом давления.

1.5.4. Влияние обжатия

В [19] приведены результаты исследования влияния степени деформации на коэффициент трения при холодной прокатке малоуглеродистых лент (0,01%С), которые проводились на стане 180×370/400. Было выяснено, что с увеличением обжатия коэффициент трения увеличивается. Так, при прокатке лент с начальной толщиной 0,44мм при увеличении обжатия от 3,4% до 50%, коэффициент трения увеличился с 0,01 до 0,105 при прокатке с керосином, и с 0,013 до 0,048 – с касторовым маслом.

В [22] указывается, что влияние обжатия на коэффициент трения зависит от состояния поверхности прокатываемой полосы и валков (рис.1.11).

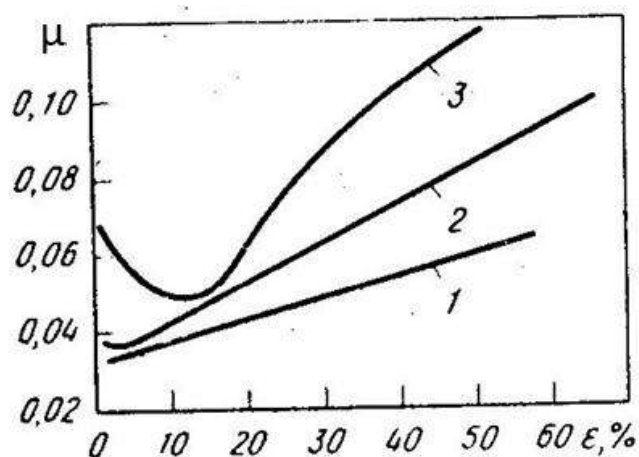


Рис.1.11. Зависимость коэффициентов трения от обжатия при прокатке наклепанных образцов на шероховатых валках с касторовым маслом - полированные образцы; 2- шероховатые; 3- грубошероховатых.

С повышением обжатия коэффициент трения возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением обжатия микронеровности глубже внедряются в тело металла, растет сила пропахивания; ухудшаются условия поступления смазки в очаг деформации.

1.5.5. Влияние смазочных материалов

В литературе говорится об однозначно снижающем эффекте смазки на значение коэффициента трения[33]. В процессе прокатки смазка затягивается в очаг деформации и разделяет трущиеся поверхности, режим трения от сухого переходит к граничному или, в особых случаях, к гидродинамическому.

Эффект снижения коэффициента трения зависит от толщины разделительного смазочного слоя и от прочностных свойств смази. Прочность смазки зависит от ее химического состава, наличия поверхностно активных веществ. Толщина разделительного слоя зависит от количества смазки затягиваемого в очаг деформации, которое, в свою очередь, зависит от вязкости смазки. Зависимость коэффициента трения от вязкости смазки приведена в [22] и показана на рис.1.12.

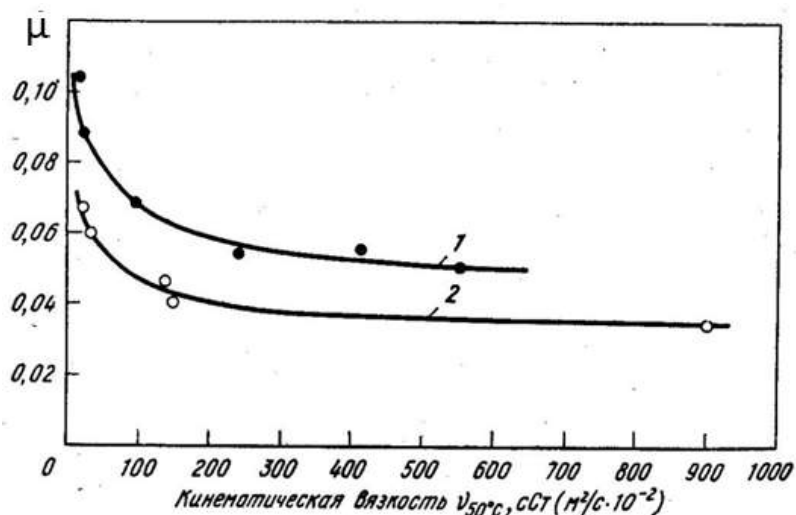


Рис.1.12. Зависимость коэффициента трения от вязкости масла: 1- минеральные масла; 2- растительные масла.

Выводы по главе 1

1. Большинство известных методов экспериментального определения коэффициента трения предусматривает исследования, выполняемые либо на лабораторных моделях, либо на действующих станах с использованием опытных образцов металла, что снижает достоверность полученных таким образом значений коэффициентов трения при использовании в расчётах технологических и энергосиловых параметров современных промышленных станков. В связи с этим требуется разработать метод, лишённый этих недостатков

2. Анализ известных формул расчета коэффициента трения в очаге деформации станков холодной прокатки показал, что наиболее обоснованной из них является модифицированная формула Грудева (1.42). Однако, она имеет существенный недостаток: не учитывает фактор, оказывающий большое влияние на величину коэффициента трения – предел текучести прокатываемой полосы, возрастающий в процессе прокатки в два-три раза из-за наклепа.

Глава 2. НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ В ОЧАГАХ ДЕФОРМАЦИИ РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

2.1. Требования к новому методу определения коэффициента трения

Изложенный в главе 1 анализ известных методов экспериментального определения коэффициентов трения между полосой и валками в рабочих клетях стана холодной прокатки даёт основания для формулирования следующих требований к новому методу:

1. Коэффициент трения необходимо определять для широкого спектра марок сталей и профилеразмеров полос, охватывающих в полном объёме сортамент промышленных станов.
2. Диапазоны учитываемых технологических параметров, влияющих на величину коэффициентов трения (скоростей прокатки, межклетевых натяжений, кинематической вязкости СОЖ, обжатию, шероховатости валков и полосы, сил прокатки) и режимы прокатки каждого вида сортамента должны соответствовать диапазонам параметров современных промышленных станов.
3. Для каждого найденного по новому методу значения коэффициента трения в очаге деформации любой рабочей клетки должно быть известно среднее значение предела текучести полосы в этом очаге деформации.
4. При обработке данных, для определения каждой конкретной величины коэффициента трения, необходимо использовать принцип, аналогичный принципу, используемому в методе давления: сравнивать расчётное и измеренное усилия прокатки, методом итераций подбирать такое значение коэффициента трения, при подстановке которого в модель усилия прокатки расхождение между расчётным и измеренными усилиями минимально.
5. Для обеспечения достоверности массива данных о значениях коэффициентов трения, полученных согласно требованию п.4, необходимо

использовать современную модель усилия прокатки, обеспечивающую минимальную погрешность расчёта, проверенную в условиях работы действующих станов.

- б. Объём массива коэффициентов трения, полученного согласно изложенным выше требованиям, должен быть достаточным для полноценной статистической обработки методами регрессионного анализа

2.2. Разработка метода определения коэффициентов трения, отвечающего требованиям, сформулированным в п.2.1

Выполнение требований, сформулированных в п 2.1, стало возможным благодаря наличию на современных станах автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые фиксируют фактические технологические и энергосиловые параметры по ходу штатного технологического процесса.

Достоверность определения значений коэффициентов трения была обеспечена путём применения для обработки данных наиболее современной модели энергосилового расчёта процесса холодной прокатки, разработанной в Череповецком государственном университете и прошедшей успешную апробацию на ряде промышленных станов [1,2,3,34,35,36]. Особенность этой модели состоит в том, что она учитывает влияние упругих участков очага деформации на контактные напряжения, силу и мощность прокатки. Это существенно снижает погрешность расчёта силы прокатки, т.к. в рабочих клетях современных станов длина упругих участков может достигать 40-70% от общей протяженности очага деформации.

На рис. 2.1 показан принятый в методике [1,2,3,34,35,36] график изменения сопротивления металла деформации на упругих и пластическом участках очага деформации в i -ой рабочей клетки.

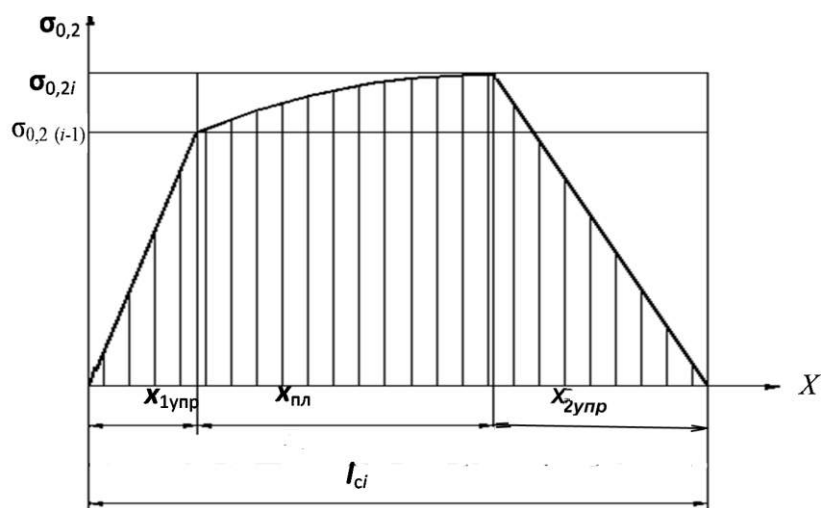


Рис.2.1. График изменения сопротивления металла деформации по длине очага деформации l_{ci} .

В качестве сопротивления деформации принята величина условного предела текучести $\sigma_{0,2}$.

$x_{1упр}$ — длина первого упругого участка, на котором материал полосы на входе в валки упруго обжимается по толщине, а сопротивление деформации изменяется по закону Гука от нуля до $\sigma_{0,2(i-1)}$:

$$\sigma_{\phi 1}(h_x) = E_{\Pi} \cdot \varepsilon_{h_x} = E_{\Pi} \frac{\Delta h_x}{h_0},$$

где Δh_x , ε_{h_x} — абсолютная и относительная деформация полосы по толщине на длине $x_{1упр}$;

$x_{пл}$ — длина пластического участка, на котором предел текучести изменяется от входного $\sigma_{0,2(i-1)}$ до выходного значения $\sigma_{0,2i}$;

$x_{2упр}$ — длина второго упругого участка, на котором происходит упругое восстановление части толщины полосы на выходе из очага деформации, при этом сопротивление деформации по закону Гука уменьшается от $\sigma_{0,2i}$ до нуля:

$$\sigma_{\phi 3}(h_x) = E_{\Pi} \cdot \varepsilon_{h_x} = E_{\Pi} \frac{\Delta h_x}{h_1},$$

где Δh_x , ε_{h_x} — абсолютная и относительная упругие деформации полосы по толщине на длине $x_{2упр}$.

В зависимости от соотношения скоростей рабочих валков и прокатываемой полосы, в методике [1,2,3,34,35,36] рассматриваются три варианта структурных

схем очага деформации: без нейтрального сечения, с одним и с двумя нейтральными сечениями. Вариант очага деформации идентифицируется с помощью следующих критериев.

Если выполняются условия

$$\frac{h_{H1}}{h_{min}} < 1, \quad \frac{h_{H1}}{h_i} < 1, \quad (2.1)$$

где h_{H1} – толщина полосы в нейтральном сечении; h_{min} – минимальная толщина полосы; h_i – толщина полосы на выходе из очага деформации, то принимается, что нейтральное сечение в очаге деформации отсутствует.

При выполнении условий

$$\frac{h_{H1}}{h_{min}} > 1, \quad \frac{h_{H1}}{h_i} > 1 \quad (2.2)$$

в очаге деформации присутствует одно нейтральное сечение. Если же

$$\frac{h_{H1}}{h_{min}} > 1, \quad \frac{h_{H1}}{h_i} < 1, \quad (2.3)$$

то в очаге деформации два нейтральных сечения. Далее для найденного типа очага деформации определяют остальные его структурные параметры: общую длину l_{ci} , среднее значение нормальных контактных напряжений $p_{срi}$ и усилие прокатки P_c с помощью выражений, приведенных в работах [1,2,3,34,35,36].

Возможность использования баз данных АСУ ТП о фактических технологических и энергосиловых параметрах действующих станов, по широкому спектру марок стали, толщин и ширин полос, содержащихся в их сортаменте, и применение указанной методики расчета усилия прокатки способствовали успешному решению задачи разработки методики определения достоверных значений коэффициента трения. Методика реализуется в такой последовательности [34,35,36].

1. Получают из АСУ ТП непрерывного стана зафиксированные там значения режимов обжатий, натяжений, скоростей и усилий прокатки в рабочих клетях для наиболее распространённых марок сталей и профилеразмеров полос.

2. Формируют из этих параметров базу данных для определения коэффициентов трения, причем количество данных (число рабочих клетей, умноженное на число режимов прокатки) должно быть достаточным для статистической обработки.
3. Производят расчет необходимых величин: абсолютного (Δh_i) и относительного (ε_i) обжатий, суммарного обжатия на входе ($\varepsilon_{\Sigma i-1}$) и выходе из очага деформации ($\varepsilon_{\Sigma i}$), упругого изменения толщины полосы на входе ($\Delta h_{1упр}$) и выходе ($\Delta h_{2упр}$) из очага деформации.
4. Определяют условный предел текучести для заданной марки стали от суммарного обжатия, используя формулу А.В. Третьякова [37]:

$$\sigma_{0,2i} = \sigma_{0,2исх} + A\varepsilon_{\Sigma i}^B, \quad (2.4)$$

где $\sigma_{0,2исх}$ - исходный предел текучести, A и B – справочные величины, с помощью которых находят условные пределы текучести на входе в клеть $\sigma_{0,2i-1}$, на выходе из нее $\sigma_{0,2i}$, их среднее значение $\sigma_{\phi i}$:

$$\sigma_{\phi i} = \sigma_{0,2исх} + \frac{A}{B+1} \frac{\varepsilon_{\Sigma i}^{B+1} - \varepsilon_{\Sigma i-1}^{B+1}}{\varepsilon_{\Sigma i} - \varepsilon_{\Sigma i-1}} \quad (2.5)$$

5. Определяют по модели в первом приближении средние нормальное контактное давление в очаге деформации $p'_{срi} = 1.15\sigma_{\phi i}$, абсолютное обжатие Δh , изменения толщины полосы на первом $\Delta h_{1упр}$ и втором $\Delta h_{2упр}$ упругих участках;
6. Для каждого комплекса взаимосвязанных параметров по фактическому технологическому режиму выполняют серию расчетов усилия прокатки, $P_{расчi}$. Основными этапами расчета являются:
 - подстановка очередного значения коэффициента трения, который варьируется от минимального (μ_{min}) до максимального (μ_{max}) значений с определенным шагом $\Delta\mu = \frac{\mu_{max} - \mu_{min}}{n}$, (n выбирается экспериментатором) так, чтобы рассчитанные усилия прокатки оказались как больше, так и меньше измеренного значения $P_{расчi}$, зафиксированного АСУ ТП;

- определение геометрических и силовых параметров упруго-пластического очага деформации:

$x_{1упр}$ -толщина полосы на первом упругом участке;

$x_{пл}$ - длина пластического участка;

x_2 -длина зоны отставания пластического участка;

x_3 - длина зоны опережения пластического участка;

x_4 - длина второго упругого участка;

$x_{4отс}$ -длина второй зоны отставания;

$x_{4опер}$ - длина зоны опережения второго упругого участка;

p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 - средние давления в зонах очага деформации;

h_{min} -минимальная толщина полосы;

$h_{Н1}$ - толщина полосы в первом нейтральном сечении;

$h_{Н2}$ - толщина полосы во втором нейтральном сечении,

l_{ci} - длина очага деформации и среднее для него значение контактного нормального напряжения (среднее удельное давление) p_{cpi} ;

- проверка условия $\frac{p'_{cpi} - p_{cpi}}{p_{cpi}} < 5\%$, при этом, если условие не

выполнено, то принимают следующее приближение $p'_{cpi} = p_{cpi}$ и

цикл расчета параметров очага деформации выполняют снова; после выполнения указанного условия производят расчет усилия прокатки $P_{расчi}$.

7. Определяют для каждого расчетного значения усилия прокатки погрешность его вычисления (расхождение между расчетным и фактическим усилиями) и фиксируют такое значение коэффициента трения ($\mu_{иск}$), при котором погрешность расчета $\Delta P_i = |P_{расчi} - P_{измi}|$ минимальна. Блок-схема изложенного алгоритма определения коэффициента трения с использованием баз данных АСУТП действующих станов показана на рис.2.1.

Компьютерная реализация алгоритма была выполнена с помощью математического пакета «Mathcad 7».

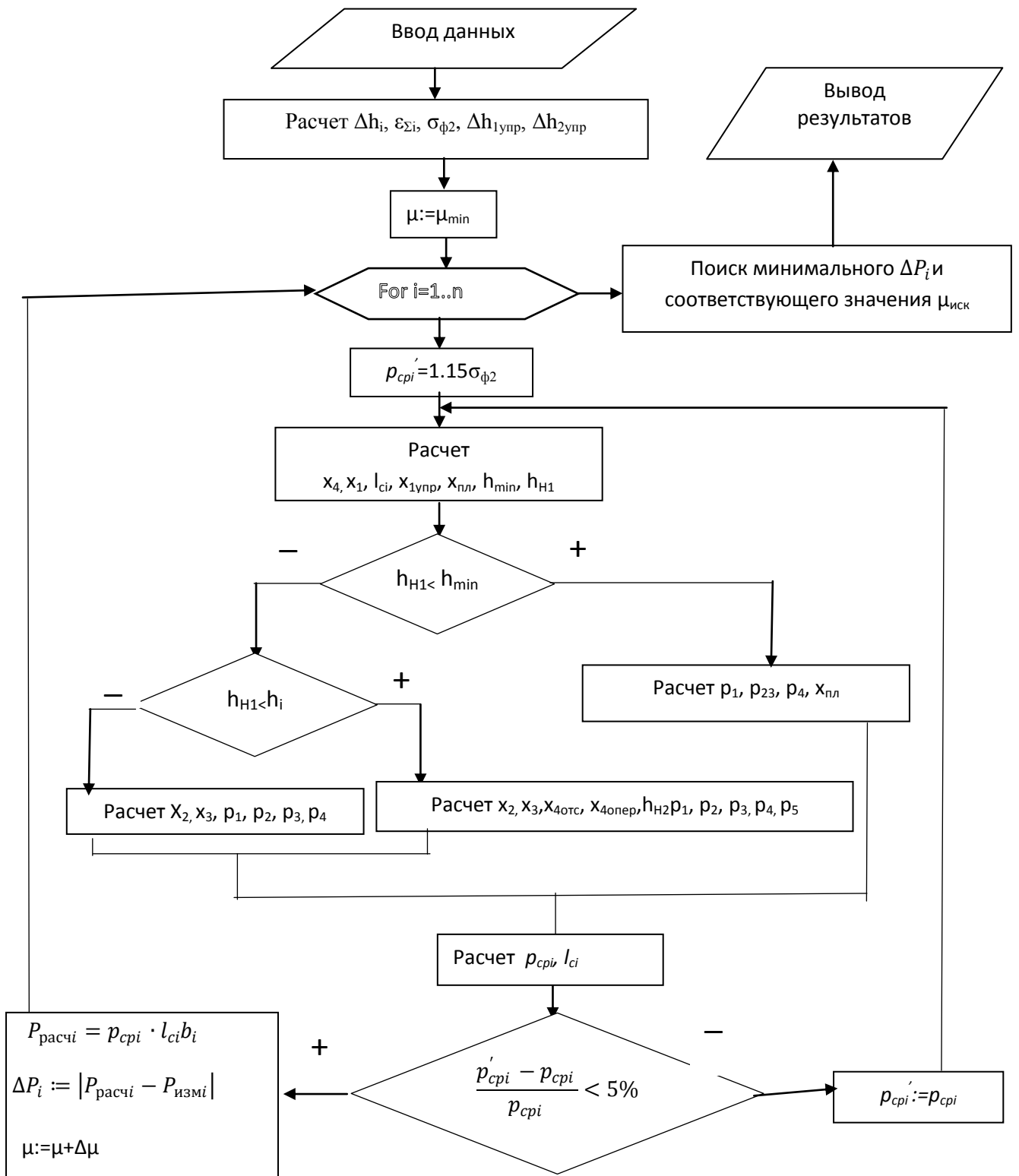


Рис.2.1. Блок-схема алгоритма определения коэффициентов.

При реализации алгоритма учли, что шероховатость рабочих валков R_a , входящая в число исходных данных для расчёта коэффициента трения, зависит не только от технологии подготовки поверхности бочки валков к установке в клеть (шлифовки, текстурирования), но и от износа поверхностного слоя бочки во время межперевалочной кампании.

Изменение шероховатости вследствие износа определяли с помощью следующих регрессионных зависимостей [34]:

- для шлифованных валков:

$$R_a = R_{a \text{ исх}} - 0,1141 \cdot \tau + 0,0064 \cdot \tau^2 \quad (2.6)$$

- для текстурированных валков:

$$R_a = R_{a \text{ исх}} - 0,32 \cdot \tau + 0,018 \cdot \tau^2 \quad (2.7)$$

где $R_{a \text{ исх}}$ – исходное значение шероховатости (для шлифованных валков $R_{a \text{ исх}}=0,6\text{мкм}$, для текстурированных $R_{a \text{ исх}}=2,8-4,4\text{мкм}$), τ - время, прошедшее с момента установки рабочих валков в клеть, час.

Выражения (2.6), (2.7) могут быть уточнены на каждом стане в процессе подготовки и эксплуатации валков, с учетом их материала, термообработки и износостойкости поверхностного слоя бочки, причем желательно, вместо времени работы валков, использовать длину прокатанных полос.

Выводы по главе 2

1. Сформулированы требования к новому методу определения коэффициента трения в очагах деформации рабочих клетей станов холодной прокатки: широкий спектр марок сталей и профилеразмеров полос, охватывающих в полной объёме сортамент современных станов; соответствие диапазонов технологических параметров, влияющих на коэффициент трения, и параметров СОЖ, используемых для реализации метода, диапазонам параметров, используемым на промышленных станах; включение в число исходных данных предела текучести материала полосы, изменяющегося в

функции обжатия в результате наклёпа полосы, сопоставление рассчитанных и фактических усилий прокатки, взятых из базы данных АСУТП, как основа для определения достоверных значений коэффициента трения; достаточность массива найденных значений коэффициентов трения для статистической обработки.

2. Разработан алгоритм компьютерной реализации нового метода определения коэффициента на промышленном стане, не требующий вмешательства в штатный технологический процесс и полностью удовлетворяющий требованиям, указанным в п.1.

Глава 3. РАЗРАБОТКА НОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

3.1. Статистическая обработка массива значений коэффициентов трения в очаге деформации, полученных из базы данных АСУТП действующего стана

Регрессионный анализ предназначен для построения количественной модели процесса, в которой уравнение, связывающее k входных (x_1, x_2, \dots, x_k) и выходной y параметры, представляет собой некоторую формулу, расчеты по которой хорошо совпадают с экспериментальными данными. Такая формула или математическая модель процесса в общем случае может иметь любой вид, но обычно в регрессионном анализе используют уравнение, в котором переменные содержат степени не выше второй [38,39,40]:

$$\begin{aligned}
 y = & a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_k x_k + \\
 & + a_{12}x_1 x_2 + a_{13}x_1x_3 + \dots + a_{k-1,k} x_{k-1}x_k + \\
 & + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + \dots + a_{kk}x_k^2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

В первой строке уравнения записаны линейные члены, во второй - парные произведения первых степеней переменных, которые называются парными взаимодействиями и отражают эффекты совместного влияния факторов на величину y , в третьей - квадратичные члены. Более сложные модели в регрессионном анализе не рассматриваются. Обычно в реальной задаче стараются оставить возможно меньшее количество членов уравнения (3.1), но достаточное для правильного описания процесса.

Решение задачи получения регрессионного уравнения проводили в следующем порядке:

- выбор вида регрессионной зависимости;
- вычисление коэффициентов уравнения регрессии;

- проверка адекватности построенного уравнения результатам наблюдений.

Применив изложенную в главе 2 методику, был сформирован массив данных, содержащий 580 значений коэффициентов трения, диапазон изменения которых составил 0,010-0,182, относящихся к режимам холодной прокатки на 5-ти клетевом стане «1700» 116-ти полос толщиной $h_1=0,29 - 2,55$ мм, шириной от 990мм до 1565мм из подката толщиной $h_0= 1,49 - 5,59$ мм, изготовленных из сталей пяти марок – 1пс, 08пс, 08ю, 01ют, SAE1006.

Основные технологические и энергосиловые параметры имели при прокатке полос следующие диапазоны значений: $\sigma_{0,2i}=200-800$ МПа, $p_{срi}=450-850$ МПа, $P_{измi}=4,86-17,62$ МН, $R_{ai}=0,15-4,4$ мкм, $\varepsilon_i=2,5-34,7\%$, $v_i=4-19$ м/с, $\sigma_{i-1}=25-190$ МПа, $\sigma_i=35-190$ МПа. Геометрическая характеристика очага деформации - параметр $l_i/h_{ср}$, где $h_{ср}=(h_0+h_1)/2$, имел значения в диапазоне от 3 до 17.

На первом этапе с помощью программного пакета «STATISTICA 7» выполнили статистический анализ сформированного массива значений коэффициентов трения с целью получения линейного регрессионного уравнения, выражающего зависимость этого коэффициента от указанных переменных параметров. В результате этой работы было получено следующее регрессионное уравнение:

$$\mu_i = 0,02444 + 0,004 \cdot \frac{l_i}{h_{срi}} - 0,00018 \cdot \sigma_{0i} + 0,00028 \cdot \sigma_{1i} + 0,0073 \cdot R_{ai} + 0,0006 \cdot v_i - 0,0003 \cdot \sigma_{0,2i} - 0,002 \cdot \varepsilon_i \quad (3.2)$$

Адекватность уравнения (3.2) сформированному массиву фактических данных исследовали с помощью программы «STATISTICA 7» путем проверки выполнения двух условий:

$$\frac{S_y^2}{S_{ост}^2} \geq 5...10, \quad (3.3)$$

$$R^2 \geq 0,75, \quad (3.4)$$

где S_y^2 -статистическая оценка дисперсии рассеяния значений выходного параметра (коэффициента трения) относительно точных значений;

S_{ocm}^2 - остаточная дисперсия, обусловленная влиянием на коэффициент трения неучтенных факторов и ошибками измерения всех параметров;

R^2 - критерий, который показывает, какая доля из общего рассеяния зафиксированных значений коэффициента трения относительно среднего значения обусловлена его регрессионной зависимостью (3.2) от влияющих факторов.

Величины S_Y^2/S_{ocm}^2 и R^2 рассчитываются программой «STATISTICA 7» автоматически по формулам, известным из теории регрессионного анализа. Они оказались равными $S_Y^2/S_{ocm}^2 = 372, R^2 = 0,69$, т.е. условие (3.4) для уравнения (3.2) не выполняется и уравнение не может считаться статистически достоверным.

Кроме оценки достоверности уравнения (3.2) в целом, было проведено ранжирование входящих в него факторов – определение показателей значимости каждого из них, выявление незначимых, чтобы, если таковые будут обнаружены, удалить их из регрессии. В качестве факторов рассматривались члены уравнения (3.2) $1/h_{cp}$, σ_{0i} , σ_{1i} , R_{ai} , V_i , $\sigma_{0,2i}$, ε_i , а в качестве показателя значимости использовали, согласно требованиям теории регрессионного анализа, t-критерий Стьюдента, равный

$$t_k = \frac{|a_k|}{S_{ak}},$$

где k – номер члена в уравнении регрессии (3.2);

a_k - коэффициент при k -ом члене;

S_{ak} - статистическая оценка среднеквадратического отклонения величины a_k от такого значения, которое могло быть получено, если бы для анализа использовалась полная (генеральная) выборка значений коэффициента трения.

Условие значимости k -го фактора в уравнении регрессии (3.2) имеет вид:

$$t_k \geq t_{табл}(\alpha, f), \quad (3.5)$$

где $t_{табл}(\alpha, f)$ - табличное значение t-критерия Стьюдента для уровня значимости α и числа степеней свободы f .

Под уровнем значимости в регрессионном анализе понимают вероятность ошибки; обычно считают приемлемой вероятностью ошибки 5%, поэтому мы приняли $\alpha = 0,05$. Число степеней свободы определяют по формуле:

$$f = N - K - 1,$$

где N – число членов в сформированном массиве данных ($N=580$);

K – число факторов, включенных в уравнение (3.2) ($K=8$).

Следовательно, табличное значение t-критерия Стьюдента для уравнения (3.2) должно быть взято при $\alpha = 0,05$ и $f=571$. По таблице, входящей в программный пакет «STATISTICA 7», определили: $t_{табл}(0,05;571) = 1,66$. Результаты расчета t-критериев Стьюдента для всех членов уравнения (3.2) приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1. Результаты расчета t-критериев Стьюдента для членов уравнения (3.2).

к	Член уравнения (3.2)	a_k	t_k
0	свободный	0,2444	22,86
1	$1/h_{cp}$	0,004	0,94
2	σ_{0i}	-0,00018	0,52
3	σ_{1i}	0,00028	0,64
4	R_{ai}	0,0073	7,92
5	v_i	0,0006	1,98
6	$\sigma_{0,2i}$	-0,0003	21,59
7	ε_i	-0,002	7,81

Из таблицы можно сделать вывод о том, что условие (3.5) не выполняется для членов уравнения регрессии $1/h_{cp}$, σ_{0i} и σ_{1i} , следовательно, они не являются статистически значимыми.

На втором этапе работы для повышения достоверности регрессионного уравнения в него включили парные эффекты влияния факторов: $R_{ai} \cdot v_i$, $R_{ai} \cdot \sigma_{0,2i}$,

$R_{ai} \cdot \varepsilon_i$, $v_i \cdot \sigma_{0.2i}$, $v_i \cdot \varepsilon_i$ и $\sigma_{0.2i} \cdot \varepsilon_i$. После расчёта коэффициентов регрессии было получено уравнение:

$$\mu_i = 0,3248 + 0,0605 \cdot R_{ai} - 0,0142 \cdot v_i - 0,0005 \cdot \sigma_{0.2i} + 0,00047 \cdot \varepsilon_i - 0,00067 \cdot R_{ai} \cdot v_i - 0,000049 \cdot R_{ai} \cdot \sigma_{0.2i} - 0,001437 \cdot R_{ai} \cdot \varepsilon_i + 0,000025 \cdot v_i \cdot \sigma_{0.2i} - 0,000041 \cdot v_i \cdot \varepsilon_i + 10^{-6} \cdot \sigma_{0.2i} \cdot \varepsilon_i \quad (3.6)$$

Проверка статистической достоверности уравнения (3.6) с помощью рассчитанных значений $\frac{S_y^2}{S_{ост}^2} = 398$; $R^2 = 0,739$ показала невыполнение условия (3.4).

Все коэффициенты уравнения регрессии (3.6) были проверены с помощью t-критерия значимости Стьюдента (3.5), значение которого для (3.6) $t_{табл}(0,05; 568) = 1,66$. Результаты проверки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Результаты расчета t-критериев Стьюдента для членов уравнения (3.6).

k	Член уравнения (3.6)	a_k	t_k
0	свободный	0,3248	10,42
1	R_{ai}	0,0605	8,27
2	v_i	-0,0142	7,36
3	$\sigma_{0.2i}$	-0,0005	9,39
4	ε_i	0,00047	0,54
5	$R_{ai} \cdot v_i$	-0,00067	2,32
6	$R_{ai} \cdot \sigma_{0.2i}$	-0,000049	4,32
7	$R_{ai} \cdot \varepsilon_i$	-0,001437	10,19
8	$v_i \cdot \sigma_{0.2i}$	0,000025	12,60
9	$v_i \cdot \varepsilon_i$	-0,000041	0,93
10	$\sigma_{0.2i} \cdot \varepsilon_i$	10^{-6}	0,17

Поскольку условие (3.4) для регрессионного уравнения (3.6) не выполнено, оно не может считаться статистически достоверным и требует уточнения путем включения нелинейных эффектов влияющих параметров. Учитывая структуру

формулы Крагельского (1.49), в которой коэффициент трения имеет зависимость от предела текучести материала в степени $\frac{1}{2}$, в регрессионное уравнение было решено включить в качестве влияющего фактора условный предел текучести в степени 0,5.

После проверки нескольких видов нелинейных зависимостей и отсеивания незначимых факторов был получен новый наиболее достоверный вид регрессионного уравнения [44]:

$$\mu_i = f(v_{50}) \cdot (1,0631 + 0,2354 \cdot \frac{\sigma_{0,2i}}{\sigma_{0,2\min}} - 0,9869 \cdot (\frac{\sigma_{0,2i}}{\sigma_{0,2\min}})^{0,5} - 0,00456 \cdot \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\min}} + 0,000229 \cdot \frac{R_a \cdot v}{R_{a\min} \cdot v_{\min}}) \quad (3.7)$$

В уравнении (3.7) переменные параметры, влияющие на коэффициент трения, представлены в безразмерной форме, для чего в знаменатели всех членов введены их минимальные значения: $\sigma_{0,2\min} = 200 \text{ МПа}$, $\varepsilon_{\min} = 3\%$, $R_{a\min} = 0,6 \text{ мкм}$, $v_i = 1 \text{ м/с}$.

Поскольку кинематическая вязкость СОЖ оставалась постоянной, она не могла войти в регрессию в виде переменного фактора. Её решено было учесть с помощью функции $f(v_{50})$, которая для СОЖ с вязкостью $v_{50} = 30 \text{ сСт}$ в уравнении (3.2) была принята равной единице. В случае появления на станах новых СОЖ значение $f(v_{50})$ потребует уточнения путем повторной обработки базы данных АСУ ТП вышеописанным методом.

Величины $\frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2}$ и R^2 рассчитанные программой «STATISTICA 7» оказались равными $\frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2} = 847$; $R^2 = 0,91$, что с большим запасом перекрывает условия (3.3) и (3.4).

Таким образом, регрессионное уравнение (3.7) в целом достоверно определяет коэффициент трения в функции основных факторов технологии холодной прокатки и предела текучести полосы.

Табличное значение t-критерия Стьюдента для уравнения (3.7) должно быть взято при $\alpha = 0,05$ и $f=574$ и равно $t_{табл}(0.05;574)=1,66$. Результаты расчета t-критериев Стьюдента для всех членов уравнения (3.7) приведены в табл.3.3.

Из таблицы можно сделать вывод о том, что условие (3.5) выполняется для всех членов уравнения регрессии (3.7), следовательно, все они являются значимыми.

Таблица 3.3.

Значения t-критериев Стьюдента для коэффициентов уравнения регрессии (3.7)

k	Член уравнения (3.7)	a_k	t_k
0	свободный	1,0631	23,29
1	$\frac{\sigma_{0,2i}}{\sigma_{0,2i \min}}$	0,2354	14,20
2	$\left(\frac{\sigma_{0,2i}}{\sigma_{0,2i \min}}\right)^{0.5}$	-0,9869	17,85
3	$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i \min}}$	-0,00456	8,32
4	$\frac{R_{ai} \cdot v_i}{R_{a \min} \cdot v_{\min}}$	0,000229	8,46

3.2. Анализ полученного регрессионного уравнения: выявление зависимостей коэффициента трения от параметров, влияющих на его величину.

Сопоставление расчётных значений коэффициентов трения при помощи регрессионного уравнения (3.7) и экспериментально полученных значений провели показано в таблице 3.4.

Из таблицы 3.4. видно, что рассчитанные минимальные и максимальные значения коэффициентов трения очень близки к экспериментальным.

Учитывая установленную разнонаправленность влияния на коэффициент трения факторов технологии при прокатке полосы на непрерывном стане, мы

проанализировали характер изменений коэффициента трения при движении полосы через рабочие клетки, приняв в качестве объекта исследования типичный современный 5ти клетевой стан 1700 бесконечной холодной прокатки ПАО «Северсталь».

Таблица 3.4.

Сопоставление экспериментальных и расчётных по уравнению регрессии (3.7) значений коэффициентов трения.

Значения коэффициента трения		Номер рабочей клетки				
		1	2	3	4	5
Максимальное	экспериментальное	0,182	0,084	0,052	0,057	0,084
	расчетное	0,159	0,088	0,048	0,06	0,071
Минимальное	экспериментальное	0,038	0,012	0,011	0,012	0,01
	расчетное	0,031	0,011	0,011	0,01	0,016

Коэффициент трения рассчитывали по новому регрессионному уравнению. Характер графика этого изменения показан на рис. 6 на примере прокатки полосы из стали 01ЮТ толщиной 0,9 мм, шириной 1510 мм из подката толщиной 3,28 мм.

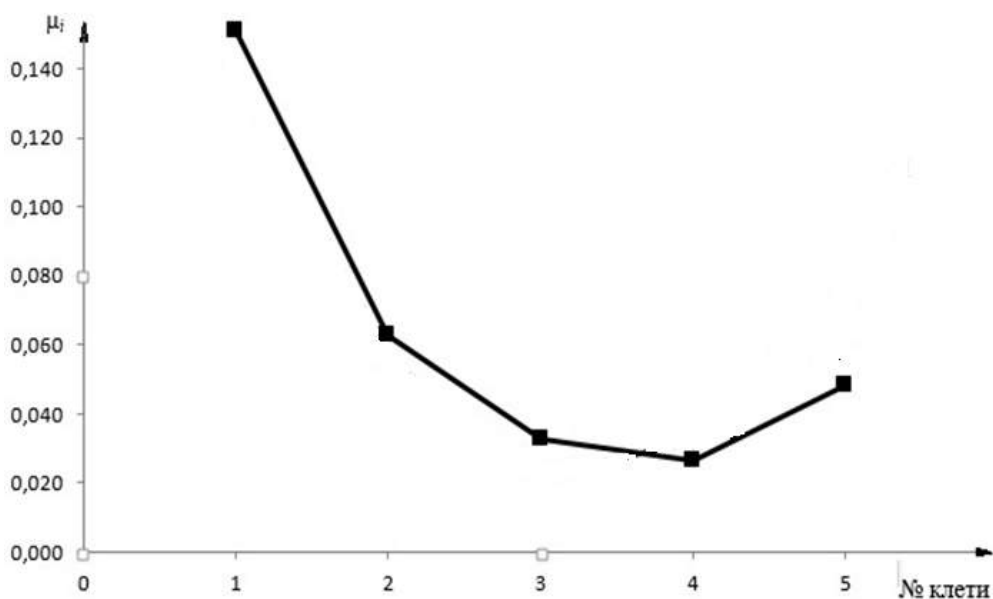


Рис.3.1. Изменение коэффициентов трения по клетям непрерывного стана (прокатка полосы толщиной 0,9 мм, шириной 1510 мм из подката толщиной 3,28 мм).

Из графика видно, что в первых клетях происходит существенное снижение коэффициента трения, т.к. преобладающим фактором является рост предела текучести полосы, а в последних двух клетях коэффициент трения растёт, т.к. воздействие увеличивающейся в этих клетях скорости прокатки перекрывает влияние замедлившегося наклёпа полосы.

Учитывая доказанную достоверность полученного нового регрессионного уравнения (3.7), мы использовали его для выяснения влияния каждого из значимых факторов технологии прокатки на величину коэффициента трения в очаге деформации. Для этого поочерёдно изменяли в реальном диапазоне каждый фактор, сохраняя остальные неизменными, и определяли по уравнению зависимость коэффициента трения от этого фактора.

Из графика рис.3.2 видна существенная зависимость коэффициента трения от условного предела текучести прокатываемой полосы, подтверждающая теоретические положения И.В. Крагельского: при росте условного предела текучести от уровня 250-350 МПа, соответствующего его значениям в 1-й клетки, до уровня 700-800 МПа, соответствующего упрочненному состоянию полосы в последней клетки, коэффициент трения при шероховатости валков $R_a=0,6$ мкм

уменьшается в 4-6 раз: от 0,15-0,17 до 0,025-0,04. Очевидно, этот фактор является главной причиной высоких значений коэффициента трения в первых клетях непрерывных станов.

Увеличение шероховатости бочек рабочих валков естественно вызывает рост коэффициента трения (рис.3.3), однако градиент этого роста существенно зависит от скорости прокатки. При скорости $v_i=5\text{м/с}$, соответствующей скоростному режиму первых клетей, увеличение шероховатости в 5 раз (от $R_a=0,5\text{ мкм}$ до $R_a=2,5\text{ мкм}$) приводит к росту коэффициента трения на 15-25%, а такое же увеличение шероховатости при скорости $v_i=15\text{м/с}$ (кривая 3 на рис.3.3), соответствующей скоростному режиму последних клетей, вызывает рост коэффициента трения почти в 2 раза. Причину такого влияния скорости легче объяснить, рассмотрев графики зависимостей от неё коэффициента трения.

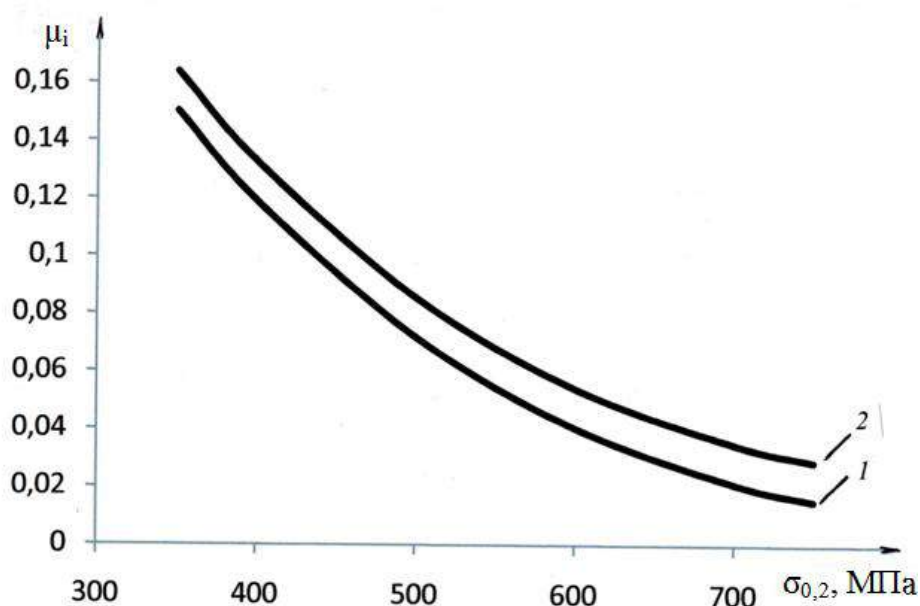


Рис.3.2. Зависимость коэффициента трения от условного предела текучести прокатываемой полосы, рассчитанная по формуле (3.2) (скорость прокатки $v_i=15\text{м/с}$; шероховатость поверхности бочек валков $R_a=0,6\text{ мкм}$) при значениях частного обжатия ε_i 1 – 10%; 2 – 25%.

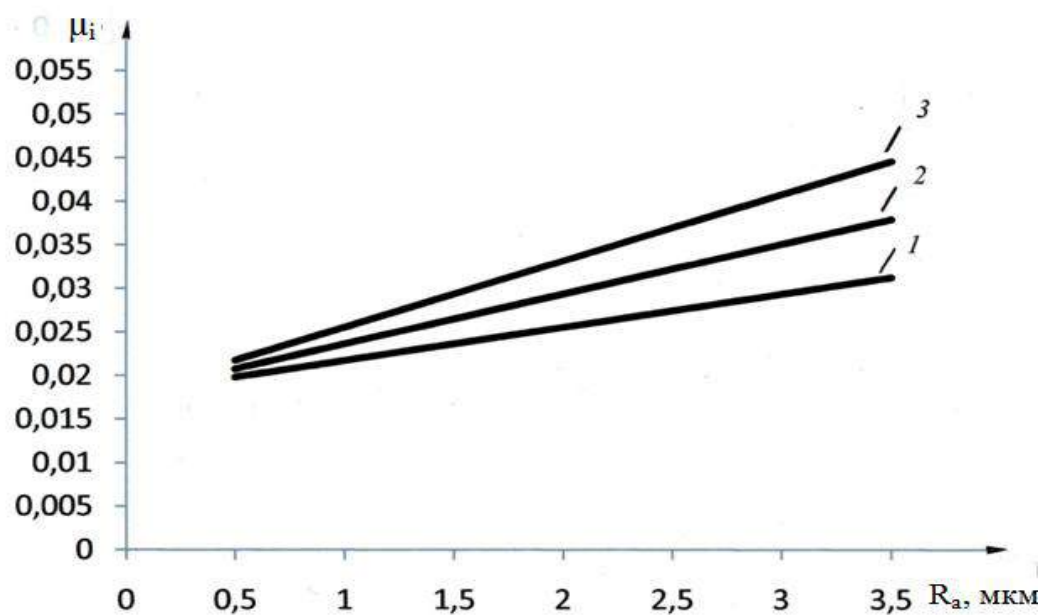


Рис.3.3. Зависимость коэффициента трения от шероховатости поверхности валков, рассчитанная по формуле (3.2) (частное обжатие $\varepsilon_i=25\%$; предел текучести прокатываемой полосы $\sigma_{0,2}=650$ МПа) при скоростях прокатки v_i : 1 – 5 м/с; 2 – 15 м/с; 3 – 25 м/с.

Графические зависимости коэффициента трения от скорости прокатки, рассчитанные по уравнению регрессии (3.7), показаны на рис.3.4. Из графиков видно, что с ростом скорости прокатки коэффициент трения увеличивается, особенно это увеличение значительно при максимальной шероховатости валков. Следует отметить, что при изменении скорости прокатки на коэффициент трения влияют две противоположно действующие тенденции. С одной стороны, рост скорости прокатки способствует увеличению количества СОЖ, поступающей в очаг деформации, что уменьшает коэффициент трения. С другой стороны, повышение скорости прокатки разогревает СОЖ, снижая её кинематическую вязкость, что увеличивает коэффициент трения. Графики рис.3.4 свидетельствуют со статистической достоверностью о преобладании последней тенденции.

Полученные зависимости коэффициента трения о скорости прокатки существенно корректируют известные из прежних исследований данные о влиянии скорости холодной прокатки на величину коэффициента трения. Наибольшее распространение в энергосиловых расчётах получила зависимость

коэффициента трения от скорости прокатки, выражения графиком Стоуна [24], согласно которому, максимальные значения $\mu=0,1-0,14$ имеют место при скоростях менее 3 м/с, с ростом скорости до 5-6 м/с коэффициент трения снижается до 0,03-0,05, после чего незначительно возрастает или остаётся постоянным.

При получении графика Стоуна, очевидно, не учитывалось влияние предела текучести на коэффициент трения, поэтому данные, представленные в нашей работе, являются более достоверными: максимальные значения коэффициентов трения при малых скоростях являются следствием минимальной величины предела текучести, а не скорости прокатки.

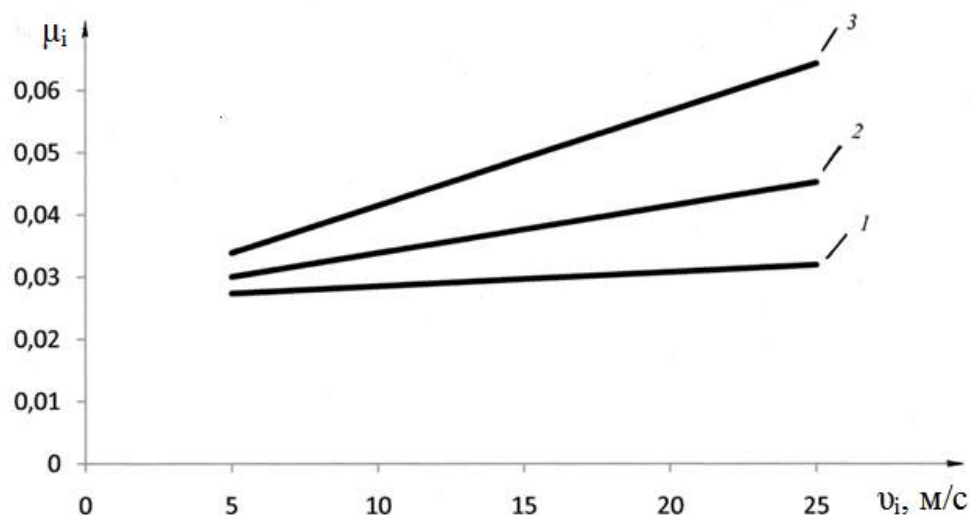


Рис.3.4. Зависимость коэффициента трения от скорости прокатки, рассчитанная по формуле (3.7) (частное обжатие $\varepsilon_i=25\%$; предел текучести прокатываемой полосы $\sigma_{0,2}=650$ МПа) при различной шероховатости поверхности валков R_a : 1 – 0,6 мкм; 2 – 2,8 мкм; 3 – 4,4 мкм.

Зависимость коэффициента трения от частного относительного обжатия показана на рис.3.5. Из графиков видно, что с увеличением обжатия коэффициент трения несколько снижается, что не совпадает с данными работы [3], согласно которым увеличение обжатия вызывает рост коэффициента трения. Однако автор работы [3] не учитывал влияние на коэффициент трения предела текучести

металла: рост обжатия ε_i вызывает увеличение его среднего значения в i -ой клетки, что, в свою очередь, как видно из рис.3.2, снижает коэффициент трения. Поэтому графики на рис.3.5 более достоверно отражают взаимосвязи между величинами ε_i и μ_i .

Поскольку классические зависимости не базируются на представительных, статистически значимых массивах данных о параметрах промышленной прокатки и были получены в то время, когда эти параметры существенно отличались от параметров современных станов, следует признать установленные нами зависимости коэффициента трения от значимых факторов технологии более достоверными и заслуживающими внесения взамен устаревших в современную теорию энергосилового расчёта станов холодной прокатки.

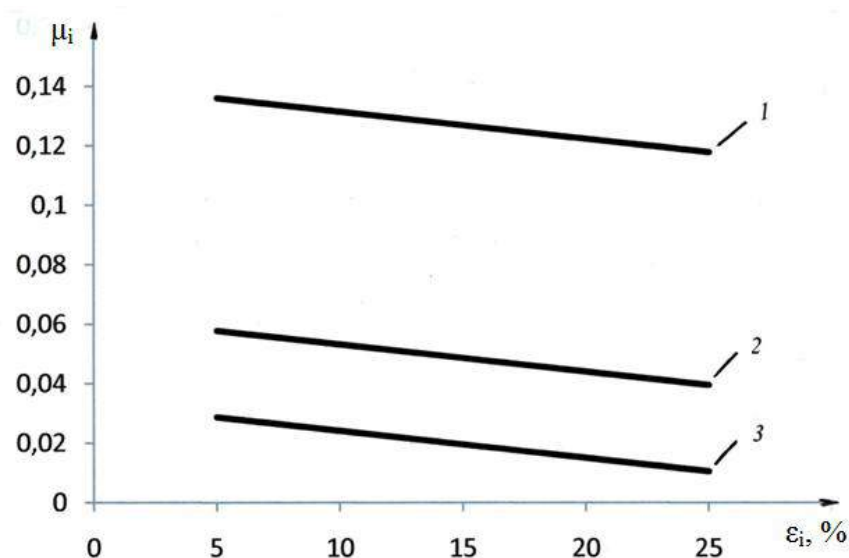


Рис.3.5. Зависимость коэффициента трения от частного обжатия в очаге деформации, рассчитанная по формуле (3.7) (скорость прокатки $v_i=10\text{м/с}$; шероховатость поверхности валков $R_a=0,6\text{ мкм}$) при значениях условного предела текучести полосы: 1 – 400 МПа; 2 – 600 МПа; 3 – 800 МПа.

Выводы по главе 3.

1. Получено новое статистически достоверное регрессионное уравнение для расчёта величины коэффициента трения между полосой и валками в рабочих клетях современных станов холодной прокатки.
2. Методом регрессионного анализа впервые установлено, что, наряду с кинематической вязкостью СОЖ, значимыми факторами, влияющими на коэффициент трения, являются предел текучести полосы, относительное обжатие в очаге деформации, шероховатость бочки валков и скорость прокатки.
3. Для условий холодной прокатки впервые установлено, что с ростом предела текучести полосы коэффициент трения существенно снижается, а с ростом частного обжатия он также несколько снижается из-за влияния увеличивающегося предела текучести полосы.
4. Установлено, что с ростом скорости прокатки коэффициент трения также растёт во всём диапазоне изменения скоростей, что существенно корректирует известные из прежних исследований представления о влиянии скорости прокатки на коэффициент трения.

Глава 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОЙ МОДЕЛИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

1.1. Расчет усилия прокатки

Эффективность использования в энергосиловых расчетах стана холодной прокатки значений коэффициента трения, найденных с помощью уравнения (3.7), проверили следующим образом [41,42,43,44].

1. Для режимов прокатки на 5-ти клетьевом стане «1700», содержащихся в упомянутом выше массиве данных (с учетом количества рабочих клеток – 580 режимов) рассчитали значения коэффициентов трения по наиболее достоверной из известных формул – модифицированной формуле А.П. Грудева (1.42) ($\mu_{(1.42)}$) и по регрессионному уравнению (3.7) ($\mu_{(3.7)}$).
2. Используя два альтернативных значения коэффициента трения $\mu_{(1.42)}$, $\mu_{(3.7)}$, рассчитали для всех режимов прокатки два значения усилия прокатки в каждой (i-ой) клетки: $P_{i(1.42)}$, $P_{i(3.7)}$, подставив в расчетные формулы альтернативные значения коэффициента трения $\mu_{(1.42)}$ и $\mu_{(3.7)}$.
3. Рассчитали для каждой клетки абсолютную погрешность расчета усилий $P_{i(1.42)}$ и $P_{i(3.7)}$:

$$\Delta P_{i(1.42)} = |P_{изм\ i} - P_{i(1.42)}|; \quad \Delta P_{i(3.7)} = |P_{изм\ i} - P_{i(3.7)}|$$

4. Рассчитали для каждой клетки относительную погрешность расчета усилий $P_{i(1.42)}$ и $P_{i(3.7)}$:

$$\delta P_{i(1.42)} = \frac{|P_{изм\ i} - P_{i(1.42)}|}{P_{изм\ i}} \cdot 100\% ; \quad \delta P_{i(3.7)} = \frac{|P_{изм\ i} - P_{i(3.7)}|}{P_{изм\ i}} \cdot 100\%$$

5. Обобщив результаты расчета по всем режимам прокатки, определили максимальную, среднюю и минимальную погрешности расчета усилий с использованием двух альтернативных формул расчета коэффициента трения.

Сопоставительные данные о погрешностях расчета представлены в табл.4.1 и табл. 4.2.

Таблица 4.1.

Абсолютные погрешности расчета усилий прокатки на 5-ти клетьевом стане «1700» с использованием значений коэффициента трения, вычисленных по формуле А.П. Грудева (1.42) и по регрессионному уравнению (3.7).

Погрешность расчета, МН		Номер рабочей клетки					В среднем по стану
		1	2	3	4	5	
Средняя	$\Delta P_{i(1.42)}$	1,95	1,32	0,91	1,44	1,49	1,42
	$\Delta P_{i(3.7)}$	0,67	0,53	0,61	0,75	0,77	0,67
Максимальная	$\Delta P_{i(1.42)}$	5,24	4,22	4,77	4,87	5,06	4,83
	$\Delta P_{i(3.7)}$	1,65	1,86	1,39	1,53	1,71	1,63
Минимальная	$\Delta P_{i(1.42)}$	0,32	0,03	0,11	0,06	0,021	0,11
	$\Delta P_{i(3.7)}$	0,02	0,01	0,06	0,04	0,018	0,03

Как видно из табл.4.1. средняя абсолютная погрешность вычисления усилия прокатки при использовании уравнения (3.7) составляет 0,67МН, в то время как при использовании (1.42) в 2 раза больше - 1,4 МН. Максимальные погрешности применения формулы (1.42) дают в 3 раза большую погрешность, чем (3.7).

Из табл. 4.2. видно, что средние погрешности расчета усилия прокатки в рабочих клетях с использованием формулы(3.7) находится в диапазоне 4,69-8,83%, а в целом по стану средняя погрешность составляет 6,3%, что более чем в 2 раза меньше средней погрешности расчета усилий с использованием коэффициентов трения, рассчитанных по модифицированной формуле А.П. Грудева.

Таблица 4.2.

Относительные погрешности расчета усилий прокатки на 5-ти клетьевом стане «1700» с использованием значений коэффициента трения, вычисленных по формуле А.П. Грудева (1.42) и по регрессионному уравнению (3.7).

Погрешность расчета, %		Номер рабочей клетки					В среднем по стану
		1	2	3	4	5	
Средняя	$\delta P_{i(1.42)}$	22,0	13,9	11,1	11,8	20,0	15,6
	$\delta P_{i(3.7)}$	4,7	5,6	7,4	6,1	8,8	6,5
Максимальная	$\delta P_{i(1.42)}$	35,4	24,0	39,4	33,9	39,0	35,2
	$\delta P_{i(3.7)}$	15,8	16,0	16,9	17,4	17,1	16,8
Минимальная	$\delta P_{i(1.42)}$	2,2	0,11	1,1	2,5	0,4	1,1
	$\delta P_{i(3.7)}$	0,1	0,1	0,6	0,3	0,4	0,2

1.2. Расчет мощности главного привода [44,45].

Чтобы оценить погрешности вычисления мощности главного привода с использованием альтернативных выражений коэффициента трения (1.42) и (3.7), была выбрана одна из наиболее достоверных методик расчета мощности [1,2,3], которая имеет следующие отличия от других методик:

- касательные контактные напряжения в очаге деформации определяют отдельно на каждом участке очага деформации; при этом на упругих участках, вместо уравнения пластичности, используют уравнения упругого состояния материала;

- учитывает влияние положения нейтрального сечения в очаге деформации на величину работы прокатки и зависимость мощности прокатки от касательных напряжений;
- достоверно определяет потери энергии на трение качения в контакте между рабочими и опорным валками, в зависимости от соотношения их диаметров бочек, величины давления в межвалковом контакте, относительной угловой скорости вращения и шероховатости поверхности их бочек.

Согласно методике [1,2,3] рабочий момент, подведенный к валкам i -ой клетки «кварто» со стороны главного привода, равен (см. рис.4.1):

$$M_{pi} = M_{при} + M_{натi} + M_{тр.пi} + M_{опi}, \quad (4.1)$$

$$\text{где } M_{при} = \frac{N_{при}}{\omega_{pi}} - \text{момент прокатки,} \quad (4.2)$$

$N_{при}$ – мощность прокатки в i -ой клетки, рассчитываемая через удельные работы прокатки на каждом участке очага деформации;

ω_{pi} - угловая скорость рабочих валков;

$M_{натi}$ – момент разности сил натяжений полосы перед и за i -ой клетью;

$M_{тр.пi}$ – момент трения в подшипниках рабочих валков;

$M_{опi}$ – момент, необходимый для вращения опорных валков, включающий момент трения качения.

Существенное преимущество методики [1,2,3] по сравнению с большинством других методик энергосилового расчета состоит в том, что момент прокатки рассчитывается по формуле (4.2) через мощность прокатки, т.е. без использования эмпирического коэффициента плеча силы прокатки ψ , точное значение которого не известно. Это существенно уменьшает погрешность определения момента и мощности двигателей главного привода стана. Подробные алгоритмы вычисления каждого из моментов, входящих в формулу (4.1), приведены в работах [1,2,3].

Мощность, которую необходимо подвести к валкам i -ой клетки, равна

$$N_{pi} = M_{pi} \cdot \omega_{pi}; \quad (4.3)$$

а требуемая мощность главных двигателей рабочей клетки:

$$N_{\text{дв}i} = \frac{N_{pi}}{\eta}; \quad (4.4.)$$

где η – к.п.д. линии главного привода, учитывающий потери на трение в шпинделях, муфтах, зубчатых передачах и их подшипниках.

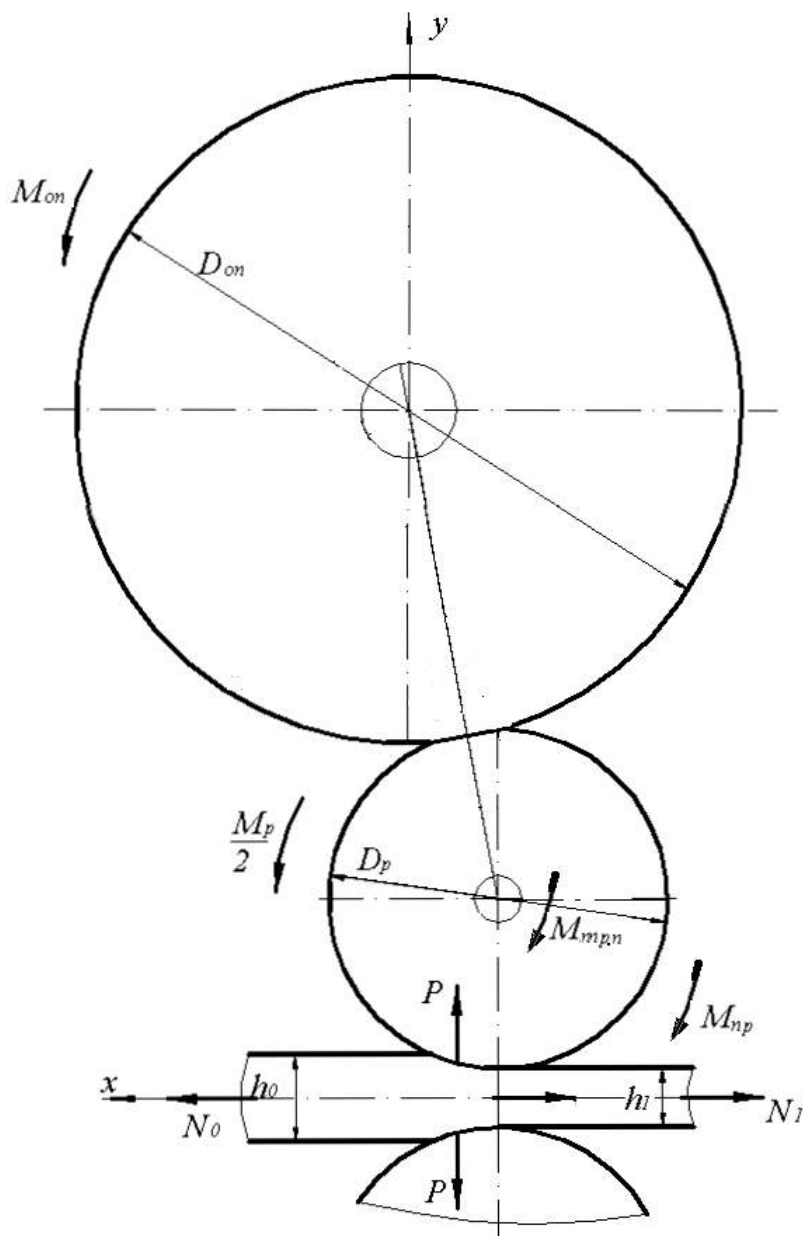


Рис. 4.1. Схема действия сил и моментов в клетке «кварт».

По изложенной методике выполнили расчет мощности главных двигателей рабочих клеток пятиклетевого стана «1700» холодной прокатки для 30 реальных технологических режимов прокатки полос толщиной 0,3-2,2мм, шириной 1000-1465мм из стали марок 1пс, 08пс, SAE1006, 01ЮТ, 08Ю. В качестве исходных

данных в расчет вводили фактические параметры процесса (толщины полосы на входе и выходе; заднее и переднее удельные натяжения σ_{i-1} , σ_i , скорости полосы на выходе v_i , силу прокатки P_i , силу тока якоря главного привода $I_{дв}$ и др.), зафиксированные системой контроля, являющейся составной частью АСУ ТП стана.

Расчет выполняли в двух вариантах, отличающихся только формулой коэффициента трения. В первом варианте рассчитывали мощность главного двигателя с использованием формулы (1.42) ($N_{дв.расч(1.42)}$), во втором варианте – с использованием формулы (3.7) ($N_{дв.расч(3.7)}$).

Для оценки погрешности расчетов определяли фактическую мощность двигателей, подводимую из сети, по формуле:

$$N_{\phi i} = n \cdot I_{\phi i} \cdot U_{\phi i}, \quad (4.5)$$

где $U_{\phi i}$ - напряжение на зажимах двигателя;

n – коэффициент, учитывающий количество якорей в двигателе (для исследуемого стана $n=2$).

Погрешности расчета определяли по формулам:

а) для первого варианта:

$$\Delta N_{\phi i(1.42)} = \frac{|N_{\phi i} - N_{дв.расч(1.42)}|}{N_{\phi i}} \cdot 100\% ;$$

б) для второго варианта

$$\Delta N_{\phi i(3.2)} = \frac{|N_{\phi i} - N_{дв.расч(3.2)}|}{N_{\phi i}} \cdot 100\% .$$

Фактические режимы прокатки приведены в табл.4.3, а результаты расчетов и оценки погрешностей – в табл.4.4. Как видно из таблицы 4.3, при расчете мощности с использованием модифицированной формулы А.П. Грудева (1.42) диапазон погрешностей составил 4,4-28,5%, а среднее значение 13,6%. При использовании новой формулы коэффициента трения (3.7) диапазон погрешностей составил 0,8-14,7%, а среднее значение 7,4%.

Таким образом, расчет коэффициента трения по новой формуле (3.7), учитывающей влияние наклепа металла, снизил среднюю погрешность расчета мощности главного привода рабочих клеток стана холодной прокатки в 1,7 раза, а разброс погрешностей - в 2 раза.

Таблица 4.3.

Фактические режимы прокатки стальных полос на 5-ти клетевом стане «1700».

<i>№ ре- жима</i>	<i>Марка стали, ширина полосы, толщина подката</i>	<i>№ кле- ты, i</i>	<i>h_{i-1}, мм</i>	<i>h_i, мм</i>	<i>σ_{i-1}, МПа</i>	<i>σ_i, МПа</i>	<i>P_i, МН</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1пс $b=1050$ $h_0=3,013$	3	1,76	1,347	146,9	170,1	8,53
2	1пс $b=1050$ $h_0=3,013$	4	1,347	1,069	170,1	181,2	7,92
3	08пс $b=1015$ $h_0=1,488$	3	0,65	0,443	155,4	167,5	7,12
4	08пс $b=1015$ $h_0=1,488$	4	0,443	0,307	167,5	183,9	9,8
5	SAE1006 $b=1167$ $h_0=2,21$	3	1,084	0,77	151,6	173,8	8,91
6	SAE1006 $b=1167$ $h_0=2,209$	4	0,77	0,55	173,8	182,1	8,56
7	SAE1006 $b=1167$ $h_0=2,205$	4	0,78	0,552	169,6	183,0	8,38
8	01ЮТ $b=1000$ $h_0=2,803$	4	0,992	0,742	172,4	184,6	5,21
9	08пс $b=1000$ $h_0=1,924$	4	0,672	0,481	177	187	6,82
10	01ЮТ $b=1000$ $h_0=5,341$	3	2,817	2,1	151	170	7,05
11	01ЮТ $b=1000$ $h_0=5,341$	4	2,1	1,602	170	189	6,18
12	01ЮТ $b=1002$ $h_0=5,075$	3	2,011	1,436	151	173	7,64
13	01ЮТ $b=1002$ $h_0=4,039$	4	1,426	1,042	174	185	6,13
14	08пс $b=1420$ $h_0=5,075$	4	3,104	2,729	118	89	11,64

1	2	3	4	5	6	7	8
15	08Ю $b=1200$ $h_0=1,989$	3	1,034	0,713	157	172	7,35
16	08ПС $b=920$ $h_0=2,019$	3	0,989	0,676	146	162	6,64
17	01ЮТ $b=1465$ $h_0=3,053$	4	1,014	0,741	172	181	10,31
18	01ЮТ $b=1375$ $h_0=2,264$	4	0,748	0,532	173	187	10,80
19	08ПС $b=1250$ $h_0=1,996$	3	1,017	0,731	141	158	7,39
20	08Ю $b=1100$ $h_0=2,455$	3	1,388	1,046	154	174	8,1
21	08ПС $b=1015$ $h_0=1,488$	1	1,488	0,99	123	138	9,69
22	08ПС $b=1015$ $h_0=1,488$	2	0,99	0,65	138	155	9,03
23	08ПС $b=1015$ $h_0=1,488$	5	0,307	0,292	181	41	9,85
24	01ЮТ $b=1375$ $h_0=2,264$	1	2,264	1,502	42	143	13,9
25	01ЮТ $b=1375$ $h_0=2,264$	2	1,502	1,063	143	145	10,8
26	SAE1006 $b=1167$ $h_0=2,205$	1	2,205	1,551	76	138	12,15
27	SAE1006 $b=1167$ $h_0=2,205$	2	1,551	1,083	138	150	11,05
28	08Ю $b=1200$ $h_0=1,989$	5	0,489	0,469	179	38	4,3
29	08ПС $b=1420$ $h_0=5,0755,0$	5	2,729	2,512	90	35	13,42
30	1пс $b=1050$ $h_0=3,013$	5	1,069	1,007	181	41	8,18

Таблица 4.4.

Результаты расчета мощности двигателей главного привода для режимов прокатки, указанных в табл.4.3.

Номер режима	Номер клетки	Фактическая мощность двигателя $N_{дв.факт}$	Расчетная мощность двигателя		Погрешность расчета	
			$N_{дв.расч(3.7)}$, МВт	$N_{дв.расч(1.42)}$, МВт	$\Delta N_{дв(3.7)}$, %	$\Delta N_{дв(1.42)}$, %
1	2	3	4	5	6	7
1	3	3,82	4,20	4,32	10,5	13,1
2	4	4,5	4,4	3,92	0,8	12,9
3	3	2,18	2,36	2,65	8,3	21,6
4	4	4,10	3,71	3,85	9,8	6,1
5	3	4,3	4,8	5,1	11,6	18,6
6	4	4,83	5,2	5,3	7,7	9,7
7	4	4,6	5,7	5,9	9,6	28,3
8	4	4,5	4,9	4,9	8,9	8,9
1	2	3	4	5	6	7
9	4	4,3	4,7	5,5	9,3	27,9
10	3	7,1	7,9	6,71	11,2	5,5
11	4	8,1	8,6	7,61	6,2	6,9
12	3	9,2	8,5	7,2	7,6	21,7
13	4	9,1	9,3	8,7	2,2	4,4
14	4	9,7	9,3	9,3	4,1	4,1
15	3	6	6,1	5,7	1,6	5,0
16	3	5,2	4,7	4,3	9,6	17,3
17	4	8,1	8,0	7,1	1,2	12,3
18	4	6,2	7,0	6,5	12,9	4,8
19	3	5,1	5,7	4,6	10,5	9,8
20	3	5,7	6,0	4,9	5,2	14
21	1	2,1	1,8	1,7	14,7	19
22	2	2,5	2,56	2,39	2,4	4,4
23	5	3,65	3,2	3,05	12,3	16,4
24	1	2,1	2,3	1,5	9,5	28,5
25	2	4,6	5,1	3,8	10,8	17,4

1	2	3	4	5	6	7
26	1	2,52	2,3	1,85	8,8	26,8
27	2	3,9	4,2	4,7	7,1	20,5
28	5	4,8	5,06	5,12	5,4	6,6
29	5	7,4	8,1	8,0	9,4	8,1
30	5	6,8	6,5	6,0	4,4	11,8

Выводы по главе 4.

1. Определение коэффициентов трения по новому регрессионному уравнению, вместо известных эмпирических формул, снизило среднюю относительную и абсолютную погрешности расчёта усилий прокатки более чем в два раза, а максимальные абсолютные погрешности расчета усилий – почти в три раза.

2. Расчет коэффициента трения по новой формуле, учитывающей влияние наклепа металла, снизил среднюю погрешность расчета мощности главного привода рабочих клеток стана холодной прокатки в 1,7 раза, а разброс погрешностей - более, чем в 2 раза.

Глава 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖИМОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

5.1. Методика оптимизации технологических режимов на многоклетевом стане холодной прокатки

Значительное снижение погрешностей энергосилового расчета процесса холодной прокатки на широкополосных станах с применением новой регрессионной модели коэффициента трения (3.7), дало основание для использования этой модели при разработке энергоэффективных режимов прокатки на действующих станах. Энергоэффективным назвали такой режим прокатки, который, благодаря оптимальному распределению между клетями натяжений и обжатий, позволяет прокатать полосу заданного профилеразмера с меньшими затратами электроэнергии, чем действующий для данного профилеразмера режим, при этом качество холоднокатаного листа, как минимум, не должно снижаться.

Для корректировки режимов использовалась оптимизационная модель взаимосвязанных технологических и энергосиловых параметров непрерывного многоклетевого стана холодной прокатки, разработанная учеными научной школы Череповецкого государственного университета [46,47,48,49,50].

Согласно этой модели, принцип оптимизации по критерию «минимум энергозатрат» основывается на следующих теоретических положениях, обоснованных и проверенных на практике:

1. Полезную работу валки каждой рабочей клетки совершают только в зоне отставания очага деформации, а в зоне опережения полоса возвращает валкам часть затраченной энергии. Следовательно, изменяя положение нейтрального сечения в очаге деформации, можно влиять на удельный расход энергии при прокатке: сдвиг нейтрального сечения назад уменьшает расход энергии, а сдвиг вперед – увеличивает.

2. На положение нейтрального сечения в каждой рабочей клетки можно воздействовать параметрами режима прокатки:

- а) перераспределением и изменением (в допустимых границах) переднего и заднего натяжений полосы;
- б) перераспределением частных обжатий между клетями (при неизменном заданном суммарном обжатии);

3. Затраты энергии, отнесенные к одному проценту частного обжатия, минимальны в 1-ой клетки (где металл имеет минимальный предел текучести) и возрастают в каждой последующей клетки (из-за наклепа металла, вызывающего рост сопротивления деформации). Поэтому для экономии энергии в целом по непрерывному стану целесообразно устанавливать в 1-ой клетки максимально возможное частное обжатие (с учетом ограничений по допустимой силе прокатки и паспортной мощности двигателей главного привода). В следующих клетях целесообразно частные обжатия последовательно уменьшать.

4. Положение нейтрального сечения в рабочей клетки влияет также на чистоту поверхности полосы, причем – в противоположном направлении, чем на расход энергии: сдвиг нейтрального сечения вперед увеличивает чистоту поверхности, но приводит к повышенному расходу энергии. При этом положения нейтральных сечений в рабочих клетях характеризовали отношением:

$$X_i = \frac{x_{пл.отст}}{x_{пл}},$$

где $x_{пл.отст}$ – длина зоны отставания пластического участка очага деформации; $x_{пл} = x_{пл.отст} + x_{пл.опер}$ – полная длина пластического участка очага деформации; $x_{пл.опер}$ – длина зоны опережения (i – номер рабочей клетки).

Исходя из приведенных положений, при оптимизации режимов прокатки на непрерывном стане следует руководствоваться таким принципом:

- в наиболее энергоемких клетях (как правило – в промежуточных) сдвигать нейтральное сечение назад, чтобы сэкономить максимально возможное количество энергии;

- в одной или двух последних клетях, где удельный расход энергии меньше, сдвигать нейтральное сечение вперед, чтобы повысить чистоту поверхности полосы, выходящей из стана.

5.2. Оптимизация технологического режима на пятиклетевом стане холодной прокатки «1700»

Эффективность новой модели коэффициента трения проверили на пятиклетевом стане «1700» ОАО «Северсталь» при холодной прокатке полос, относящихся к одному из характерных видов сортамента: сталь CHES 30, ширина 1250мм, толщина на выходе из стана 0,48мм, толщина горячекатаного подката 2,1мм. Режим прокатки этих полос, регламентированный технологической инструкцией (в дальнейшем – рабочий режим), приведен в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Рабочий режим холодной прокатки полос из стали CHES 30 шириной 1250мм, толщиной 0,48мм из подката толщиной 2,1мм.

№ клетки i	Толщина после клетки h_i , мм	Частное обжатие ε_i , %	Удельное натяжение за клетью, σ_i , МПа	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2i}}$	Усилие прокатки P_i , МН
1	1,47	30	145	0,23	11,29
2	1,029	30	160	0,22	11,35
3	0,72	30	150	0,20	12,41
4	0,504	30	165	0,21	13,63
5	0,048	5	37	0,05	19,43

Диапазон рабочих скоростей прокатки полос этого вида сортамента составляет 13-20 м/с. Параметры, указанные в табл. 5.1, определяли при фактических скоростях полосы на выходе из пятой клетки $v_5=14$ м/с – 16м/с.

Параметры режима прокатки полос того же профилеразмера, оптимизированного по изложенной выше методике, представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2.

Параметры оптимизированного режима холодной прокатки на стане «1700» полос из стали CHES 30 шириной 1250мм, толщиной 0,48мм из подката толщиной 2,1мм.

№ клетки i	Толщина после клетки h_i , мм	Частное Обжатие ε_i , %	Удельное натяжение за клетью σ_i , МПа	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2i}}$	Натяжение за клетью, т	Усилие прокатки P_i , МН
1	1,323	37	134,99	0,21	22,78	1966
2	0,979	26	149,99	0,21	18,73	2285
3	0,724	26	190,15	0,25	17,56	2251
4	0,500	31	199,92	0,25	12,75	3418
5	0,480	4	36,91	0,05	2,26	2156

Сопоставление энергозатрат при прокатке по рабочему и оптимизированному режимам выполнили по следующей методике.

1. Для рабочего и оптимизированного режимов прокатки рассчитали значения коэффициентов трения в очагах деформации всех клеток пятиклетевого стана «1700» по двум альтернативным формулам:

$\mu_i^{(1)}$ - по модифицированной формуле А.П. Грудева (1.42);

$\mu_i^{(2)}$ - по новому регрессионному уравнению (3.7).

2. Используя эти альтернативные значения коэффициентов трения, рассчитали по модели энергосиловых параметров [47,48] мощности главного привода (по клетям и суммарную) и показатели положения нейтральных сечений X_i при прокатке по рабочему и оптимизированному режимам.

3. Рассчитали экономию энергии от оптимизации режима прокатки путем сравнения суммарных расчетных мощностей главного привода в рабочем и оптимизированном режимах. Этот расчет сделали в двух вариантах: с использованием в каждой клетки альтернативных значений коэффициента трения $\mu_i^{(1)}$ и $\mu_i^{(2)}$.
4. Поскольку этапы 2 и 3 излагаемой методики относятся к режиму прокатки полос на постоянной рабочей скорости, а фактически часть цикла прокатки проходит на пониженных скоростях, с разгонами и замедлениями, экономию, рассчитанную в п.3, скорректировали, введя коэффициент $K_{\text{попр}}=0,7$, установленный из практического опыта.
5. Рассчитанные по п.п. 3;4 значения экономии энергии сопоставили с фактической экономией, измеренной при прокатке двух опытных партий полос указанного выше сортамента.

Рулоны каждой опытной партии были разделены на 2 группы: рулоны первой группы прокатали по рабочему режиму, рулоны второй группы – по оптимизированному. Всего было прокатано 15 рулонов: 6 по рабочему режиму, 9 – по оптимизированному.

При испытаниях на каждом рулоне контролировалась и обеспечивалась непрерывная запись следующих параметров:

- толщина подката и толщина полосы после всех клетей;
- натяжения во всех межклетевых промежутках;
- скорость прокатки на выходе из клетей;
- силы тока якорей двигателей рабочих клетей;
- напряжения на обмотках двигателей.

Для расчета фактического расхода и экономии электроэнергии при прокатке полос опытных партий использовали следующую методику:

- для двух сравниваемых рулонов (один рулон, прокатанный по рабочему режиму, другой – по оптимизированному) находили значения «мгновенной» мощности (в кВт) в определенные дискретные моменты времени цикла прокатки каждого рулона;

- по значениям «мгновенной» мощности вычисляли среднюю мощность на длине рулона в кВт. Фактический удельный расход электроэнергии в кВт·ч/т определяли путем деления средней мощности на часовую производительность, которую определяли путем деления массы рулона в тоннах на время прокатки рулона в часах;

- сравнивали фактические удельные расходы электроэнергии при прокатке рулонов по рабочему и оптимизированному режимам.

В таблицах 5.3 и 5.4 приведены сравнительные результаты расчета мощности главного привода при прокатке по рабочему и оптимизированному режимам с использованием альтернативных значений коэффициента трения: $\mu_i^{(1)}$ (табл. 5.3) и $\mu_i^{(2)}$ (табл. 5.4).

Таблица 5.3.

Результаты расчета мощности главного привода при прокатке полос на пятиклетевом стане «1700» по рабочему и оптимизированному режимам при использовании значений коэффициента трения $\mu_i^{(1)}$, рассчитанных по формуле (1.42).

№ клетки i	Расчетные параметры					
	рабочий режим			Оптимизированный режим		
	$\mu_i^{(1)}$	X_i	$N_{двi}$, кВт	$\mu_i^{(1)}$	X_i	$N_{двi}$, кВт
1	0,037	0,739	1450	0,037	0,802	1960
2	0,026	0,986	2700	0,025	0,922	2285
3	0,025	0,922	3250	0,025	0,890	2250
4	0,025	0,863	3275	0,024	0,878	3420
5	0,024	0,946	1880	0,023	1,000	2155
Суммарная мощность			12555			12070
Экономия энергии, %						3,8
а) на рабочей скорости						
б) средняя для рулона						2,66

Из представленных в табл. 5.5 данных о фактических удельных расходах энергии видно, что при использовании новой формулы коэффициента трения расхождение расчетной и фактической экономии энергии, составляют менее +4,5%, а при использовании формулы Грудева – более 60%, т.е. в 13 раз больше.

Таблица 5.4.

Результаты расчета мощности главного привода при прокатке полос на пятиклетевом стане «1700» по рабочему и оптимизированному режимам при использовании значений коэффициента трения $\mu_i^{(2)}$, рассчитанных по формуле (3.7).

№ клетки i	Расчетные параметры					
	рабочий режим			Оптимизированный режим		
	$\mu_i^{(1)}$	X_i	$N_{двi}, \text{кВт}$	$\mu_i^{(1)}$	X_i	$N_{двi}, \text{кВт}$
1	0,067	0,630	1476	0,065	0,662	2035
2	0,035	0,814	2760	0,035	0,787	2365
3	0,031	0,795	3298	0,031	0,785	2310
4	0,027	0,765	3333	0,027	0,770	3546
5	0,025	0,920	1900	0,025	0,922	2210
Суммарная мощность			12767			12466
Экономия энергии, %						2,35
а) на рабочей скорости						
б) средняя для рулона						1,65

Таблица 5.5.

Фактические удельные расходы энергии при прокатке по рабочему и оптимизированному режимам.

Режим	Удельные затраты энергии, кВт·ч/т						
	Номер клетки, i					В целом	Экономия, %
	1	2	3	4	5		
оптимизированный	11,88	9,56	10,44	17,94	8,75	58,58	1,58
рабочий	8,46	12,88	14,45	16,72	6,98	59,50	

Таким образом, доказано, что при разработке усовершенствованных режимов холодной прокатки на непрерывных станах использование в энергосиловых расчётах новой регрессионной модели коэффициента трения многократно повышает достоверность и надёжность результатов этих работ.

Выводы по главе 5.

1. Проверка эффективности новой регрессионной модели коэффициента трения на действующем стане показала, что при её использовании расхождение расчётной и фактической экономии энергии при оптимизации режима прокатки, по сравнению с использованием модернизированной формулы Грудева уменьшается в 13 раз.
2. Результаты проверки доказали достоверность и эффективность разработанной модели коэффициента трения и целесообразность ее использования в энергосиловых и технологических расчетах современных станов холодной прокатки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенной работы заключаются в следующем:

1. Обоснована актуальность создания новой методики экспериментального определения коэффициента трения в очаге деформации при холодной прокатке стальных полос на современных станах с целью создания математической модели коэффициента трения, позволяющей определять его значения с минимальной погрешностью.
2. Выполнен литературно-аналитический обзор методов и известных эмпирических формул определения коэффициента трения в очаге деформации при холодной прокатке. Установлено, что большинство из них были получены в условиях, существенно отличающихся от условий работы современных станов по скоростям, давлениям, сортаменту прокатываемых полос, применяемым смазочно-охлаждающим жидкостям и состоянию микрогеометрии поверхности валков. Кроме того, ни одна из известных формул не учитывает фактор, оказывающий большое влияние на величину коэффициента трения - предел текучести прокатываемой полосы, возрастающий в процессе прокатки в два-три раза из-за наклепа.
3. Разработан новый метод определения коэффициента трения в очаге деформации станов холодной прокатки, позволяющий использовать данные АСУТП стана. Новый метод определения коэффициента трения может быть реализован на промышленном стане без нарушения регламентного технологического процесса, что повышает достоверность полученных с его помощью значений коэффициентов трения.
4. Получено новое регрессионное уравнение, выражающее значимые зависимости коэффициента трения между полосой и валками от шероховатости бочки рабочих валков, скорости прокатки, частного относительного обжатия в клетки и среднего значения условного предела текучести прокатываемой полосы. Достоверность полученных уравнений

доказана статистическими методами. Значимость всех факторов, входящих в уравнения, подтверждена с использованием критерия Стьюдента.

5. Установлено, что с ростом предела текучести полосы коэффициент трения существенно снижается, а с ростом частного обжатия он также несколько снижается из-за влияния увеличивающегося предела текучести полосы.
6. Установлено, что с ростом скорости прокатки коэффициент трения также растёт во всём диапазоне изменения скоростей, что существенно корректирует известные из прежних исследований представления о влиянии скорости прокатки на коэффициент трения.
7. Достоверность разработанной методики определения коэффициента трения подтверждена сопоставлением расчетных и измеренных энергосиловых параметров процесса холодной прокатки на статистически значимом массиве. Определение коэффициентов трения по новым регрессионным уравнениям, вместо известных эмпирических формул, снизило среднюю погрешность расчёта усилий прокатки и мощности главного привода в 1,7-2,0 раза.
8. Новое регрессионное уравнение было использовано при оптимизации технологических режимов действующего пятиклетового стана «1700» по критерию «минимум энергозатрат». При расчете оптимизированного режима с применением нового уравнения расхождение расчетной и фактической экономии энергии оказалось менее 5%, а при расчете с применением наиболее распространенной формулы А.П. Грудева – более 60%, т.е. в 13 раз больше. Таким образом, показано, что при разработке усовершенствованных режимов холодной прокатки на непрерывных станах использование в энергосиловых расчётах новой регрессионной модели коэффициента трения многократно повышает достоверность и надежность результатов этих работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевникова И.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов: монография/И.А.Кожевникова, Э.А. Гарбер. – Череповец: ГОУ ВПО ЧГУ, 2010 – 275с.
2. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология)/ Э.А. Гарбер. -М.:ОАО «Черметинформация» - Череповец: ЧГУ, 2004. - 416с.
3. Гарбер Э.А. Производство проката: справочное издание. Том 1. Книга1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование)/ Э.А. Гарбер. – М.: Теплотехник, 2007. - 368с.
- 4.Белосевич В.К. Трение, смазка, теплообмен при холодной прокатке листовой стали/ В.К. Белосевич. - М.:Металлургия, 1989.
5. Горенштейн М. М. Увеличение обжатий по условиям трения при прокатке на обжимных станах/ М.М. Горенштейн. -М.:Металлургиздат, 1960. – 101с.
6. Павлов И.М. Научные доклады высшей школы. Metallургия/И.М. Павлов, А.Е. Шелест. - 1959. - 112с.
- 7.YamanouchiH., MatsuuraY. — «ReportoftheCastingResearchLaboratory, WasedaUniversity», 1957, № 8, p. 57—62.
- 8.Павлов И.М., Галлай Я.С., Силин И.В. – «Металлург», 1934г, №4, с.6-36.
9. Мутьев М.С. – «Металлург», 1939, № 4-5, с. 87-89 и ил.
10. Павлов И. М., Гет Н. Н. – «Металлург», 1936, №7, с.47-54 с ил.
11. Грудев А. П.- «Обработка металлов давлением». Вып. IV. М., Metallургиздат, 1956, с.32-41 с ил.
12. Павлов И. М., Галлай Я. С. – «Металлург», 1935, №7, с.3 – 30.
13. Хейн А. Я. Процесс ленточной и тонколистовой прокатки. М., Metallургиздат, 1941. 247 с.
14. Павлов И. М. — Труды МИСиС и МЭИ. ВыпLXI. Ч. 1. М., Изд. МЭИ, 1966, с. 5—10.
15. Гарновский И. Я., Поздеев А. А., Ляшков В. Б. Деформация металла при прокатке. Свердловск, Metallургиздат. 287 с.

16. Рокотян Е. С. – «Сталь», 1949, №9, с.814-820.
17. Виноградов, А. И. Влияние анизотропии формы зерна на изменение предела текучести металла при холодной прокатке/ А. И. Виноградов, Э. А. Гарбер, И. А. Сарычева // Производство проката. – 2011. - №6 - с. 10-15.
18. Стукач А. Г., Лекаренко Е. М., Зыков Ю. С. и др. — «Цветные металлы», 1963, № 11, с. 65—69 с ил.
19. Павлов И. М., Сигалов Ю. М., Гуревич Я. Б., Зубко А. М — «Вопросы пластической деформации металла» М, Изд-во АН СССР, 1962. (Труды Института металлургии. Вып. 9), с. 109-114 с.
20. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением/ С.И. Губкин. - М.: Металлургиздат, 1947. - 532 с.
21. Sims R. B., Arthur D. F. – «J. of the Iron and SteelInst.», 1952, v.172, №3, p.285 – 295.
- 22.Грудев А.П. Внешнее трение при прокатке/ А.П. Грудев. - М.:Металлургия, 1973. – 288с.
23. Полухин П.И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при холодной прокатке/ П.И. Полухин, В.А. Николаев, В.П. Полухин, А.В. Зиновьев, Е.Н. Косаримов. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
- 24.StoneM. D. Rolling of Thin Strip. Part 2. – Iron and Steel Eng., 1953, v.30, n.2, s.61-74.
- 25.Гарбер Э.А., Гончарский А.А., и др. Определение коэффициент трения при прокатке с эмульсиями/ Э.А. Гарбер, А.А. Гончарский //Производство проката. – 2000. №12 – с.2-3.
26. Bowden F.P., Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids/ Oxford at the Clarendon. - 1964. - p. 544.
27. Дерягин Б.В. Что такое трение? / Б.В. Дерягин. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 230с.
28. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия/ К. Джонсон. - М.:Мир, 1989. - 510с.

29. Польцер Г. Основы трения и изнашивания/ Г. Польцер, Ф. Майсвер. – М.: Машиностроение, 1984. – 234с.
30. БаклиД. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии/ Д. Бакли. – М.: Машиностроение, 1986. – 359с.
31. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ/ И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов. - М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
32. Демкин Н.Б. Контактное состояние шероховатых поверхностей/ Н.Б. Демкин. - М.:Наука, 1970.
33. Whitton P.W., Ford H., Proceeding Inst/ P.W. Whitton., H. Ford// Mechanical Eng. – 1955.-169(5). - p.123.
- 34.Гарбер Э.А. Моделирование контактных напряжений и скоростного режима полосы при холодной прокатке в очаге деформации с двумя нейтральными сечениями/Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, И.А.Кожевникова//Производство проката. – 2007. - №8 – С.2.
35. Гарбер Э.А. Совершенствование силового расчета процесса холодной прокатки на основе нового метода учета упругого сплющивания в очаге деформации/Э.А. Гарбер, Д.Л. Шалаевский, И.А. Кожевникова, В.В. Кузнецов//Производство проката, 2008. - №5. - С.118.
- 36.Гарбер Э.А. Энергосиловые параметры процесса холодной прокатки стальных полос толщиной менее 0,5мм/Э.А.Гарбер, И.А, Шадрюнова //Производство проката, 2002. - №3. - С. 13.
- 37.Третьяков А.В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки/ А.В. Третьяков. - М.: Металлургия, 1966.
38. DraperN.R. Appliedregressionanalysis/ N.R. Draper, H. Smith - 3rdEditionbyJohnWileyandsons, Inc - 1998. – 736р.
39. Статистические методы и модели: учебное пособие/ В.Н. Костин, Н.А.Тишина. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2004. – 136 с.

40. Математическое моделирование и планирование эксперимента: учебное пособие/В.А. Лунёв – СПб.: Издательство политехнического университета, 2012. – 153 с.
41. Гарбер Э.А. Зависимость напряжении трения в очаге деформации при холодной прокатке от технологических факторов и предела текучести полосы/Э.А. Гарбер, И.В. Ягудин, В.В. Ермилов, А.А. Гончарский. // Производство проката.- 2009. - №7. - С. 18.
42. Гарбер Э.А. Влияние параметров технологии холодной прокатки и предела текучести материала полосы на напряжения трения в очаге деформации/Э. А. Гарбер, И.В. Ягудин, В.В. Ермилов, А.И. Трайно. // Металлы. - 2009. - №5. - С. 37.
43. Гарбер Э.А. Уточнение зависимости коэффициента трения при холодной прокатке от факторов технологического процесса методами регрессионного анализа/Э.А. Гарбер, И.В. Ягудин, В.В. Ермилов // Вестник ЧГУ. - 2009. - №3. - С. 118.
44. Гарбер Э.А. Расчёт мощности главного привода станов холодной прокатки с учётом влияния наклёпа металла на напряжения трения в очаге деформации/Э.А. Гарбер, И.В. Ягудин, В.В. Ермилов // Производство проката.- 2011. - №9. - С. 13.
45. Гарбер Э.А. Уточнение зависимостей напряжений контактного трения в очаге деформации при холодной прокатке от факторов технологического процесса/Э. А. Гарбер, И.В. Ягудин, А.И. Трайно // Металлы. - 2013. - №4. - С. 44.
46. Гарбер, Э.А. Расчет мощности процесса холодной прокатки с учетом работы переменных сил трения по длине очага деформации / Э.А. Гарбер, Д.И. Никитин, И.А. Шадрунова, А.И. Трайно// Металлы. – 2003. – №4. - С. 60.
47. Гарбер, Э.А. Расчет мощности процесса холодной прокатки с учетом работы переменных сил трения по длине очага деформации / Э.А. Гарбер, Д.И. Никитин, И.А. Шадрунова, А.И. Трайно// Металлы. – 2003. – №4. - С. 60.
48. Гарбер, Э.А. Определение энергосиловых параметров холодной прокатки тончайших полос /Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова, А.И. Трайно // Бюллетень «Черная металлургия». – 2002. –№2. – С. 47.

49. Гарбер, Э.А. Зависимость мощности процесса холодной прокатки от параметров очага деформации/ Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова, Д.И. Никитин // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства. Материалы IV международной научно-технической конференции, посвященной 120-летию академика И.П. Бардина. – Череповец, 2003. – С. 201.
50. Гарбер, Э.А. Пути уменьшения затрат электроэнергии при холодной прокатке на непрерывных станах / Э.А. Гарбер, И.А. Шадрунова, Д.И. Никитин, В.Л. Явкин // Труды пятого конгресса прокатчиков (Череповец, 21-24 октября 2003 г.). – Москва: ОАО «Черметинформация», 2004. – С.90.

Базы данных пятиклетевого стана холодной прокатки «1700» ОАО «Северсталь»

№ п.п.	Марка стали	b, мм	h ₀ , мм	h ₁ , мм	h ₂ , мм	T ₀ , Т	T ₁₋₂ , Т	v _i , м/с	P _{изм} , МН	μ _{эксп}	P _{рассч} , МН	μ _{рассч}	ΔP, МН	ΔP, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	SAE1006	1250	2,328	2,328	1,686	20	29,44	3,67	10,96	0,076	12,06	0,093	1,10	10,0
2	SAE1006	1250	2,33	2,33	1,682	20	29,76	5,01	10,9	0,074	12,17	0,094	1,27	11,6
3	SAE1006	1250	2,336	2,336	1,682	20	29,81	5,03	11,19	0,078	12,23	0,093	1,04	9,3
4	SAE1006	1250	2,336	2,336	1,683	20	29,65	5,31	11	0,074	12,24	0,093	1,24	11,3
5	SAE1006	1250	2,323	2,323	1,686	20	29,94	5,16	10,83	0,074	12,03	0,095	1,20	11,1
6	08пс	1250	2,138	2,138	1,57	20	27,63	5,41	10,82	0,056	12,00	0,072	1,18	10,9
7	08пс	1250	2,117	2,117	1,572	20	27,46	6,24	10,4	0,054	11,78	0,075	1,38	13,2
8	08пс	1250	2,119	2,119	1,572	20	27,46	6,15	10,5	0,056	11,79	0,074	1,29	12,3
9	08пс	1250	2,122	2,122	1,571	20	27,45	5,79	10,56	0,056	11,83	0,074	1,27	12,0
10	08пс	1250	2,023	2,023	1,394	20	24,51	5,04	11,76	0,038	12,87	0,062	1,11	9,4
11	08пс	1250	1,818	1,818	1,244	20	21,89	5,66	11,91	0,056	12,56	0,061	0,65	5,5
12	08пс	1250	1,805	1,805	1,241	20	21,81	5,68	10,92	0,046	12,47	0,062	1,55	14,2
13	08пс	1250	1,828	1,828	1,24	20	21,9	5,58	11,53	0,048	12,68	0,060	1,15	10,0
14	SAE1006	1265	2,012	2,012	1,39	20	24,71	5,91	11,19	0,066	12,83	0,087	1,64	14,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
15	SAE1006	1265	1,997	1,997	1,389	20	24,82	5,87	11,2	0,070	12,67	0,088	1,47	13,1
16	SAE1006	1265	2,01	2,01	1,389	20	24,74	6,25	11,37	0,070	12,84	0,087	1,47	12,9
17	SAE1006	1265	2,009	2,009	1,39	20	24,73	6,26	11,45	0,070	12,81	0,087	1,36	11,9
18	SAE1006	1265	2,033	2,033	1,39	20	24,55	6,01	12,01	0,074	13,07	0,085	1,06	8,8
19	08пс	1245	2,046	2,046	1,453	20	25,41	6,54	11,7	0,056	12,49	0,065	0,79	6,7
20	08пс	1245	2,04	2,04	1,451	20	25,43	6,58	11,78	0,058	12,45	0,065	0,67	5,6
21	08пс	1245	2,039	2,039	1,453	20	25,35	6,47	11,72	0,058	12,41	0,066	0,69	5,9
22	08пс	1245	2,044	2,044	1,451	20	25,28	6,57	11,87	0,058	12,49	0,065	0,62	5,2
23	08пс	1245	2,04	2,04	1,451	20	25,37	6,51	11,56	0,056	12,44	0,065	0,88	7,6
24	08пс	1245	2,032	2,032	1,453	20	25,34	6,6	11,55	0,058	12,34	0,066	0,79	6,8
25	08пс	1245	2,034	2,034	1,451	20	25,3	6,52	11,83	0,060	12,38	0,066	0,55	4,7
26	08пс	1245	2,021	2,021	1,448	20	25,26	6,75	11,49	0,058	12,29	0,067	0,80	6,9
27	08пс	1215	2,125	2,125	1,539	20	26,2	6,46	11,91	0,068	11,95	0,068	0,04	0,3
28	08пс	1215	2,116	2,116	1,537	20	26,33	6,63	11,68	0,066	11,87	0,069	0,19	1,7
29	08пс	1215	2,123	2,123	1,537	20	26,2	6,56	11,75	0,066	11,95	0,068	0,20	1,7
30	08пс	1215	2,124	2,124	1,534	20	26,31	6,68	11,73	0,064	11,99	0,068	0,26	2,2
31	08пс	1215	2,114	2,114	1,537	20	26,14	6,65	11,7	0,066	11,86	0,069	0,16	1,4
32	08пс	1215	2,125	2,125	1,534	20	26,14	6,63	11,76	0,064	12,01	0,068	0,25	2,1
33	08пс	1215	2,119	2,119	1,537	20	26,18	6,61	11,7	0,066	11,91	0,068	0,21	1,8
34	08пс	1215	2,115	2,115	1,536	20	26,23	7,06	11,87	0,068	11,89	0,069	0,02	0,2
35	08пс	1215	2,122	2,122	1,542	20	26,16	4,25	11,47	0,064	11,80	0,067	0,33	2,9
36	01ЮТ	1510	3,278	3,278	2,358	20	51,45	3,13	14,25	0,142	14,79	0,151	0,54	3,8
37	01ЮТ	1510	3,28	3,28	2,359	20	51,03	4,18	14,26	0,142	14,88	0,152	0,62	4,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
38	01ЮТ	1510	3,278	3,278	2,359	20	51,29	5,15	14,4	0,146	14,88	0,153	0,48	3,3
39	01ЮТ	1510	3,293	3,293	2,356	20	51,31	5,2	14,44	0,140	15,11	0,151	0,67	4,6
40	01ЮТ	1510	3,27	3,27	2,359	20	51,8	5,92	14,33	0,146	14,77	0,154	0,44	3,1
41	01ЮТ	1510	3,27	3,27	2,364	20	51,45	5,35	14,24	0,146	14,69	0,154	0,45	3,2
42	08Ю	1510	3,567	3,567	2,726	20	57,95	5,79	14,37	0,102	14,68	0,110	0,31	2,2
43	08Ю	1510	3,562	3,562	2,723	20	58,52	6,68	14,22	0,100	14,67	0,110	0,45	3,1
44	01ЮТ	1510	3,299	3,299	2,363	20	50,89	4,71	15,01	0,150	15,08	0,151	0,07	0,5
45	08Ю	1510	2,811	2,811	2,057	20	44,14	5,85	14,15	0,086	15,22	0,101	1,07	7,6
46	08Ю	1510	2,779	2,779	2,053	20	43,9	6,81	13,87	0,088	14,93	0,104	1,06	7,7
47	08Ю	1510	2,786	2,786	2,055	20	43,85	6,54	13,92	0,088	14,98	0,103	1,06	7,6
48	08Ю	1510	2,802	2,802	2,048	20	44,09	6,85	14,2	0,086	15,28	0,102	1,08	7,6
49	08Ю	1510	2,785	2,785	2,054	20	44,07	6,75	13,78	0,086	14,98	0,103	1,20	8,7
50	08Ю	1478	3,067	3,067	2,176	20	46,46	5,85	14,88	0,080	16,10	0,096	1,22	8,2
51	08Ю	1478	3,064	3,064	2,173	20	46,4	5,93	14,58	0,074	16,11	0,096	1,53	10,5
52	08Ю	1478	3,055	3,055	2,169	20	46,26	6,37	15,88	0,094	16,09	0,096	0,21	1,3
53	08Ю	1470	2,549	2,549	1,837	20	38,39	5,79	15,05	0,100	14,86	0,099	0,19	1,3
54	08Ю	1280	3,535	3,535	2,744	20	50,82	5,58	12,88	0,138	11,75	0,112	1,13	8,8
55	08Пс	1230	3,758	3,758	2,816	20	49,28	5,54	13,41	0,068	13,74	0,074	0,33	2,5
56	08Пс	1230	3,76	3,76	2,82	20	49,88	6,53	13,25	0,064	13,73	0,074	0,48	3,7
57	08Пс	1230	3,76	3,76	2,824	20	50,31	6,95	13,23	0,066	13,70	0,075	0,47	3,5
58	08Пс	1230	3,765	3,765	2,827	20	50,27	6,7	13,06	0,062	13,70	0,075	0,64	4,9
59	08Пс	1230	3,772	3,772	2,816	20	49,72	6,92	13,19	0,060	13,89	0,074	0,70	5,3
60	08Пс	1230	3,758	3,758	2,825	20	49,86	7,09	13,15	0,064	13,69	0,075	0,54	4,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
61	08пс	1230	3,767	3,767	2,825	20	49,91	6,87	13,16	0,062	13,76	0,075	0,60	4,5
62	08пс	1230	3,767	3,767	2,822	20	49,76	6,98	13,22	0,064	13,79	0,074	0,57	4,3
63	08пс	1230	3,763	3,763	2,822	20	50,04	7,07	13,13	0,062	13,75	0,075	0,62	4,7
64	08пс	1230	3,773	3,773	2,824	20	50,06	7,06	13,19	0,062	13,81	0,074	0,62	4,7
65	08пс	1230	3,772	3,772	2,822	20	49,96	7,06	13,23	0,062	13,83	0,074	0,60	4,5
66	08пс	1230	3,764	3,764	2,818	20	50,1	7,02	13,17	0,062	13,79	0,074	0,62	4,7
67	08пс	1230	3,764	3,764	2,814	20	50,25	6,61	13,58	0,070	13,80	0,074	0,22	1,7
68	08ю	1160	4,552	4,552	3,294	20	54,36	4,37	13,95	0,108	13,49	0,098	0,46	3,3
69	08ю	1160	4,548	4,548	3,285	20	54,2	5,09	14,43	0,116	13,55	0,098	0,88	6,1
70	08ю	1160	4,548	4,548	3,282	20	54,56	5,36	14,33	0,114	13,57	0,098	0,76	5,3
71	08ю	1160	4,557	4,557	3,281	20	54,36	5,43	14,43	0,114	13,64	0,098	0,79	5,4
72	08ю	1160	4,56	4,56	3,286	20	53,95	5,58	14,52	0,116	13,64	0,098	0,88	6,0
73	08пс	1500	2,316	2,316	1,854	15,96	39,93	5,48	11,02	0,056	12,65	0,087	1,63	14,8
74	08ю	1480	3,022	3,022	2,227	16,76	45,95	6,33	14,61	0,094	15,21	0,103	0,60	4,1
75	08ю	1480	3,019	3,019	2,228	16,91	45,94	6,39	14,78	0,098	15,16	0,103	0,38	2,6
76	08пс	1460	3,547	3,547	2,706	17,69	55,24	6,76	14,84	0,062	15,84	0,078	1,00	6,7
77	08ю	1320	4,524	4,524	3,322	17,42	63,61	4,97	14,28	0,084	15,07	0,101	0,79	5,5
78	08ю	1565	5,077	5,077	4,025	18,89	80,21	3,97	15,85	0,118	15,76	0,116	0,09	0,6
79	08ю	1565	5,081	5,081	3,999	18,04	79,85	4,12	16,14	0,116	16,11	0,115	0,03	0,2
80	01юг	1480	5,343	5,343	3,849	19	78,18	4,34	16,65	0,156	16,40	0,152	0,25	1,5
81	01юг	1480	5,339	5,339	3,846	19	79,62	4,62	16,58	0,156	16,35	0,152	0,23	1,4
82	01юг	1480	5,344	5,344	3,834	18,47	78,99	4,52	16,87	0,158	16,55	0,151	0,32	1,9
83	01юг	1480	5,433	5,433	3,831	18,12	79,87	4,42	17,52	0,150	17,28	0,147	0,24	1,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
84	01ЮТ	1480	5,341	5,341	3,834	18,38	79,27	4,58	16,74	0,156	16,51	0,151	0,23	1,3
85	01ЮТ	1480	5,343	5,343	3,833	19	78,83	4,65	16,95	0,160	16,54	0,151	0,41	2,4
86	01ЮТ	1480	5,331	5,331	3,834	19	79,65	4,53	16,74	0,158	16,39	0,152	0,35	2,1
87	01ЮТ	1480	5,449	5,449	3,846	19	79,24	4,63	17,62	0,154	17,27	0,147	0,35	2,0
88	01ЮТ	1480	5,346	5,346	3,829	19,24	78,76	4,29	16,92	0,156	16,58	0,150	0,34	2,0
89	01ЮТ	1480	5,338	5,338	3,83	20	78,48	3,89	16,64	0,154	16,48	0,151	0,16	1,0
90	01ЮТ	1480	5,374	5,374	3,913	18,13	79,35	3,34	16,62	0,166	16,00	0,154	0,62	3,7
91	01ЮТ	1480	5,321	5,321	3,875	17,51	81,46	3,34	15,92	0,156	15,86	0,154	0,06	0,4
92	01ЮТ	1425	4,069	4,069	2,867	19	58,29	3,6	15,43	0,146	15,40	0,146	0,03	0,2
93	01ЮТ	1425	4,085	4,085	2,872	19	59,13	4,9	16,13	0,156	15,50	0,146	0,63	3,9
94	01ЮТ	1425	4,087	4,087	2,857	17,97	57,99	4,71	15,91	0,146	15,79	0,145	0,12	0,7
95	01ЮТ	1425	4,077	4,077	2,86	17,11	57,78	3,83	15,78	0,146	15,68	0,145	0,10	0,6
96	01ЮТ	1000	4,564	4,564	3,246	15,98	44,98	2,55	10,73	0,146	10,78	0,148	0,05	0,5
97	01ЮТ	1000	4,559	4,559	3,253	16	45,19	2,76	10,83	0,152	10,70	0,149	0,13	1,2
98	01ЮТ	1000	4,034	4,034	2,83	16,29	39,54	3,35	10,88	0,148	10,78	0,145	0,10	0,9
99	01ЮТ	1000	3,232	3,232	2,255	17	31,25	4,74	10,22	0,140	10,43	0,144	0,21	2,0
100	01ЮТ	1000	3,219	3,219	2,256	16,92	31,43	4,86	10,11	0,142	10,31	0,146	0,20	2,0
101	SAE1006	1250	2,328	1,686	1,222	29,44	23,44	5,08	10,14	0,040	10,38	0,043	0,24	2,4
102	SAE1006	1250	2,33	1,682	1,219	29,76	23,51	6,99	9,78	0,036	10,37	0,043	0,59	6,0
103	SAE1006	1250	2,336	1,682	1,221	29,81	23,71	7,01	10,11	0,040	10,34	0,043	0,23	2,3
104	SAE1006	1250	2,336	1,683	1,221	29,65	23,35	7,41	10,1	0,040	10,39	0,043	0,29	2,9
105	SAE1006	1250	2,323	1,686	1,22	29,94	23,67	7,22	9,93	0,038	10,36	0,044	0,43	4,4
106	08ПС	1250	2,138	1,57	1,176	27,63	22,89	7,25	10,38	0,032	10,22	0,031	0,16	1,6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
107	08пс	1250	2,117	1,572	1,176	27,46	22,74	8,34	10,23	0,032	10,26	0,032	0,03	0,3
108	08пс	1250	2,119	1,572	1,177	27,46	22,98	8,24	10,33	0,032	10,24	0,032	0,09	0,9
109	08пс	1250	2,122	1,571	1,176	27,45	22,81	7,76	10,36	0,032	10,24	0,031	0,12	1,2
110	08пс	1250	2,023	1,394	0,964	24,51	18,62	7,32	10,36	0,024	9,91	0,021	0,45	4,3
111	08пс	1250	1,818	1,244	0,854	21,89	16,4	8,43	11,17	0,028	9,61	0,020	1,56	14,0
112	08пс	1250	1,805	1,241	0,855	21,81	16,41	8,37	10,24	0,024	9,62	0,020	0,62	6,1
113	08пс	1250	1,828	1,24	0,855	21,9	16,55	8,23	10,7	0,026	9,58	0,020	1,12	10,4
114	SAE1006	1265	2,012	1,39	0,957	24,71	18,56	8,73	10,33	0,036	10,44	0,036	0,11	1,0
115	SAE1006	1265	1,997	1,389	0,957	24,82	18,66	8,68	10,33	0,036	10,41	0,036	0,08	0,8
116	SAE1006	1265	2,01	1,389	0,957	24,74	18,68	9,23	10,39	0,036	10,42	0,036	0,03	0,3
117	SAE1006	1265	2,009	1,39	0,956	24,73	18,46	9,28	10,26	0,034	10,44	0,036	0,18	1,8
118	SAE1006	1265	2,033	1,39	0,957	24,55	18,59	8,94	10,31	0,034	10,44	0,035	0,13	1,3
119	08пс	1245	2,046	1,453	1,046	25,41	20,04	9,11	10,67	0,028	10,04	0,023	0,63	5,9
120	08пс	1245	2,04	1,451	1,046	25,43	20,19	9,17	10,71	0,028	10,02	0,023	0,69	6,4
121	08пс	1245	2,039	1,453	1,046	25,35	20,17	9,03	10,66	0,028	10,03	0,023	0,63	5,9
122	08пс	1245	2,044	1,451	1,046	25,28	20,13	9,13	10,79	0,028	10,03	0,023	0,76	7,0
123	08пс	1245	2,04	1,451	1,046	25,37	20,08	9,07	10,57	0,026	10,02	0,023	0,55	5,2
124	08пс	1245	2,032	1,453	1,046	25,34	20,16	9,21	10,65	0,028	10,03	0,023	0,62	5,9
125	08пс	1245	2,034	1,451	1,045	25,3	20,1	9,1	10,79	0,028	10,02	0,023	0,77	7,1
126	08пс	1245	2,021	1,448	1,046	25,26	20	9,38	10,65	0,028	10,01	0,024	0,64	6,0
127	08пс	1215	2,125	1,539	1,113	26,2	20,95	8,93	10,98	0,032	9,92	0,024	1,06	9,7
128	08пс	1215	2,115	1,535	1,113	26,33	21,05	9,13	10,89	0,032	9,88	0,025	1,01	9,3
129	08пс	1215	2,116	1,537	1,114	26,33	20,9	9,21	10,63	0,030	9,89	0,025	0,74	7,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
130	08пс	1215	2,123	1,537	1,113	26,2	20,81	9,08	10,71	0,030	9,91	0,024	0,80	7,5
131	08пс	1215	2,124	1,534	1,115	26,31	20,9	9,22	10,64	0,030	9,88	0,024	0,76	7,2
132	08пс	1215	2,114	1,537	1,113	26,14	20,71	9,21	10,71	0,030	9,91	0,024	0,80	7,4
133	08пс	1215	2,125	1,534	1,114	26,14	20,81	9,18	10,6	0,030	9,90	0,024	0,70	6,6
134	08пс	1215	2,119	1,537	1,113	26,18	21,04	9,15	10,72	0,030	9,90	0,024	0,82	7,7
135	08пс	1215	2,115	1,536	1,115	26,23	20,95	9,79	10,76	0,030	9,89	0,025	0,87	8,1
136	08пс	1215	2,122	1,542	1,114	26,16	20,65	5,88	10,81	0,030	9,88	0,024	0,93	8,6
137	01ЮТ	1510	3,278	2,358	1,714	51,45	39,72	4,32	12,43	0,056	12,89	0,063	0,46	3,7
138	01ЮТ	1510	3,28	2,359	1,714	51,03	39,88	5,78	12,45	0,056	12,95	0,063	0,50	4,0
139	01ЮТ	1510	3,278	2,359	1,715	51,29	40,22	7,14	12,43	0,058	12,93	0,063	0,50	4,0
140	01ЮТ	1510	3,293	2,356	1,716	51,31	39,79	7,21	12,35	0,056	12,92	0,063	0,57	4,7
141	01ЮТ	1510	3,27	2,359	1,715	51,8	40,45	8,23	12,38	0,058	12,88	0,064	0,50	4,1
142	01ЮТ	1510	3,27	2,364	1,716	51,45	39,9	7,46	12,46	0,058	12,95	0,064	0,49	3,9
143	08Ю	1510	3,567	2,726	2,077	57,95	48,16	7,63	12,73	0,054	13,03	0,058	0,30	2,4
144	08Ю	1510	3,562	2,723	2,083	58,52	47,84	8,83	12,38	0,050	12,94	0,059	0,56	4,5
145	01ЮТ	1510	3,299	2,363	1,712	50,89	39,51	6,59	12,85	0,060	13,05	0,062	0,20	1,6
146	08Ю	1510	2,811	2,057	1,503	44,14	34,7	8,08	12,69	0,048	12,89	0,050	0,20	1,6
147	08Ю	1510	2,779	2,053	1,505	43,9	34,65	9,41	12,48	0,048	12,85	0,052	0,37	3,0
148	08Ю	1510	2,786	2,055	1,506	43,85	34,49	9,04	12,41	0,046	12,87	0,051	0,46	3,7
149	08Ю	1510	2,802	2,048	1,506	44,09	34,79	9,43	12,37	0,046	12,79	0,051	0,42	3,4
150	08Ю	1510	2,785	2,054	1,505	44,07	34,77	9,34	12,3	0,046	12,84	0,051	0,54	4,4
151	08Ю	1478	3,067	2,176	1,554	46,46	36,03	8,3	12,74	0,044	13,01	0,046	0,27	2,2
152	08Ю	1478	3,064	2,173	1,556	46,4	35,58	8,42	12,44	0,040	13,00	0,046	0,56	4,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
153	08ю	1478	3,055	2,169	1,556	46,26	35,89	9,02	13,17	0,048	12,97	0,046	0,20	1,5
154	08ю	1470	2,549	1,837	1,335	38,39	30,2	8,04	12,53	0,050	12,29	0,048	0,24	1,9
155	08ю	1280	3,535	2,744	2,094	50,82	41,99	7,35	10,7	0,056	10,85	0,059	0,15	1,4
156	08пс	1230	3,758	2,816	2,107	49,28	39,22	7,44	11,43	0,026	11,80	0,029	0,37	3,3
157	08пс	1230	3,76	2,82	2,11	49,88	39,52	8,79	11,25	0,024	11,78	0,030	0,53	4,7
158	08пс	1230	3,76	2,824	2,111	50,31	39,82	9,39	11,28	0,024	11,77	0,030	0,49	4,3
159	08пс	1230	3,765	2,827	2,111	50,27	40,14	9,04	11,23	0,024	11,78	0,030	0,55	4,9
160	08пс	1230	3,772	2,816	2,11	49,72	39,88	9,28	11,18	0,022	11,78	0,030	0,60	5,4
161	08пс	1230	3,758	2,825	2,112	49,86	39,71	9,55	11,35	0,024	11,80	0,030	0,45	3,9
162	08пс	1230	3,767	2,825	2,111	49,91	40,05	9,26	11,25	0,024	11,80	0,030	0,55	4,8
163	08пс	1230	3,767	2,822	2,109	49,76	39,67	9,41	11,27	0,024	11,81	0,030	0,54	4,8
164	08пс	1230	3,763	2,822	2,111	50,04	39,49	9,51	11,23	0,024	11,78	0,030	0,55	4,9
165	08пс	1230	3,773	2,824	2,11	50,06	39,73	9,51	11,22	0,022	11,79	0,029	0,57	5,1
166	08пс	1230	3,772	2,822	2,111	49,96	39,68	9,52	11,27	0,024	11,78	0,029	0,51	4,6
167	08пс	1230	3,764	2,818	2,112	50,1	39,82	9,44	11,21	0,024	11,74	0,030	0,53	4,8
168	08пс	1230	3,764	2,814	2,108	50,25	39,74	8,9	11,56	0,028	11,72	0,029	0,16	1,4
169	08ю	1160	3,543	3,045	2,629	52,98	49,09	7,55	7,92	0,168	6,86	0,089	1,06	13,3
170	08ю	1160	4,552	3,294	2,358	54,36	41,06	6,17	11,18	0,044	11,40	0,047	0,22	2,0
171	08ю	1160	4,548	3,285	2,36	54,2	41,49	7,19	11,3	0,046	11,37	0,047	0,07	0,6
172	08ю	1160	4,548	3,282	2,36	54,56	41,64	7,58	11,27	0,046	11,33	0,047	0,06	0,6
173	08ю	1160	4,557	3,281	2,358	54,36	41,76	7,68	11,31	0,046	11,35	0,047	0,04	0,4
174	08ю	1160	4,56	3,286	2,36	53,95	41,62	7,87	11,21	0,044	11,40	0,047	0,19	1,7
175	08пс	1500	2,316	1,854	1,474	39,93	34,82	6,94	11,42	0,038	11,71	0,041	0,29	2,6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
176	08Ю	1480	3,022	2,227	1,637	45,95	37,43	8,72	13,33	0,058	12,85	0,052	0,48	3,6
177	08Ю	1480	3,019	2,228	1,637	45,94	37,53	8,81	13,37	0,058	12,85	0,052	0,52	3,9
178	08ПС	1460	3,547	2,706	2,047	55,24	45,79	9,03	13,65	0,030	13,79	0,032	0,14	1,0
179	08Ю	1320	4,524	3,322	2,399	63,61	50,87	6,99	12,97	0,052	12,79	0,049	0,18	1,4
180	08Ю	1565	5,077	4,025	3,173	80,21	62,33	5,08	15,45	0,076	14,78	0,065	0,67	4,4
181	08Ю	1565	5,081	3,999	3,17	79,85	62,47	5,23	15,29	0,076	14,63	0,065	0,66	4,3
182	01ЮТ	1480	5,343	3,849	2,779	78,18	62,68	6,04	15,35	0,070	14,76	0,062	0,59	3,8
183	01ЮТ	1480	5,339	3,846	2,781	79,62	61,79	6,43	15,3	0,070	14,66	0,062	0,64	4,2
184	01ЮТ	1480	5,344	3,834	2,78	78,99	62,78	6,29	15,24	0,070	14,63	0,062	0,61	4,0
185	01ЮТ	1480	5,433	3,831	2,782	79,87	63,11	6,15	15,24	0,068	14,63	0,060	0,61	4,0
186	01ЮТ	1480	5,341	3,834	2,783	79,27	61,91	6,36	15,21	0,070	14,61	0,062	0,60	4,0
187	01ЮТ	1480	5,343	3,833	2,779	78,83	62,55	6,46	15,22	0,070	14,64	0,062	0,58	3,8
188	01ЮТ	1480	5,331	3,834	2,782	79,65	60,93	6,31	15,25	0,072	14,59	0,062	0,66	4,3
189	01ЮТ	1480	5,449	3,846	2,779	79,24	62,54	6,47	15,49	0,068	14,79	0,059	0,70	4,5
190	01ЮТ	1480	5,346	3,829	2,78	78,76	61,17	5,94	15,33	0,072	14,64	0,062	0,69	4,5
191	01ЮТ	1480	5,338	3,83	2,782	78,48	61,38	5,39	15,05	0,068	14,63	0,062	0,42	2,8
192	01ЮТ	1480	5,374	3,913	2,828	79,35	61,23	4,68	15,12	0,068	14,80	0,064	0,32	2,1
193	01ЮТ	1480	5,321	3,875	2,843	81,46	61,55	4,64	14,13	0,064	14,31	0,066	0,18	1,3
194	01ЮТ	1425	4,069	2,867	2,005	58,29	43,37	5,26	13,58	0,056	13,46	0,055	0,12	0,9
195	01ЮТ	1425	4,085	2,872	2,005	59,13	43,98	7,19	13,99	0,062	13,45	0,055	0,54	3,8
196	01ЮТ	1425	4,087	2,857	2,004	57,99	43,41	6,87	13,6	0,056	13,47	0,055	0,13	1,0
197	01ЮТ	1425	4,077	2,86	2,006	57,78	43,13	5,6	13,67	0,058	13,47	0,055	0,20	1,5
198	01ЮТ	1000	4,564	3,246	2,326	44,98	35,64	3,56	9,18	0,052	9,58	0,059	0,40	4,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
199	01ЮТ	1000	4,559	3,253	2,326	45,19	35,77	3,86	9,38	0,056	9,59	0,059	0,21	2,2
200	01ЮТ	1000	4,034	2,83	1,997	39,54	30,26	4,77	9,17	0,052	9,41	0,056	0,24	2,7
201	01ЮТ	1000	3,232	2,255	1,582	31,25	24,55	6,73	8,81	0,052	8,99	0,055	0,18	2,1
202	01ЮТ	1000	3,219	2,256	1,586	31,43	24,55	6,92	8,68	0,052	8,96	0,056	0,28	3,2
203	SAE1006	1250	2,328	1,222	0,895	23,44	19,38	7,22	8,28	0,020	9,43	0,029	1,15	13,9
204	SAE1006	1250	2,33	1,219	0,893	23,51	19,44	9,92	9,02	0,018	9,47	0,030	0,45	5,0
205	SAE1006	1250	2,336	1,221	0,894	23,71	19,42	9,95	8,24	0,020	9,45	0,030	1,21	14,7
206	SAE1006	1250	2,336	1,221	0,894	23,35	19,28	10,53	9,02	0,018	9,52	0,030	0,50	5,5
207	SAE1006	1250	2,323	1,22	0,894	23,67	19,59	10,25	8,95	0,018	9,44	0,030	0,49	5,4
208	08Пс	1250	2,138	1,176	0,884	22,89	19,26	10,03	8,8	0,016	9,30	0,020	0,50	5,7
209	08Пс	1250	2,117	1,176	0,885	22,74	19,18	11,54	8,58	0,014	9,34	0,021	0,76	8,9
210	08Пс	1250	2,119	1,177	0,885	22,98	19,16	11,4	8,62	0,014	9,31	0,021	0,69	8,0
211	08Пс	1250	2,122	1,176	0,885	22,81	19,05	10,75	8,72	0,016	9,31	0,020	0,59	6,8
212	08Пс	1250	2,023	0,964	0,671	18,62	14,6	10,95	8,39	0,009	8,77	0,012	0,38	4,5
213	08Пс	1250	1,818	0,854	0,593	16,4	12,85	12,72	8,62	0,012	8,51	0,011	0,11	1,3
214	08Пс	1250	1,805	0,855	0,591	16,41	12,95	12,76	7,97	0,007	8,48	0,011	0,51	6,4
215	08Пс	1250	1,828	0,855	0,59	16,55	12,73	12,52	8,43	0,011	8,44	0,011	0,01	0,2
216	SAE1006	1265	2,012	0,957	0,662	18,56	14,66	13,29	8,13	0,016	8,98	0,023	0,85	10,4
217	SAE1006	1265	1,997	0,957	0,663	18,66	14,62	13,2	8,15	0,018	8,96	0,023	0,81	10,0
218	SAE1006	1265	2,01	0,957	0,661	18,68	14,8	14,11	8,2	0,018	8,95	0,023	0,75	9,2
219	SAE1006	1265	2,009	0,956	0,663	18,46	14,78	14,13	8,08	0,016	8,99	0,023	0,91	11,3
220	SAE1006	1265	2,033	0,957	0,657	18,59	14,62	13,8	8,09	0,016	8,92	0,022	0,83	10,3
221	08Пс	1245	2,046	1,046	0,762	20,04	16,52	13,11	8,74	0,010	9,15	0,014	0,41	4,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
222	08пс	1245	2,04	1,046	0,763	20,19	16,4	13,24	8,65	0,010	9,13	0,014	0,48	5,6
223	08пс	1245	2,039	1,046	0,764	20,17	16,54	12,97	8,63	0,010	9,12	0,014	0,49	5,7
224	08пс	1245	2,044	1,046	0,76	20,13	16,48	13,21	8,63	0,010	9,12	0,014	0,49	5,6
225	08пс	1245	2,04	1,046	0,763	20,08	16,52	13	8,57	0,010	9,12	0,014	0,55	6,4
226	08пс	1245	2,032	1,046	0,763	20,16	16,53	13,18	8,51	0,010	9,11	0,014	0,60	7,0
227	08пс	1245	2,034	1,045	0,763	20,1	16,43	13,06	8,61	0,010	9,11	0,014	0,50	5,8
228	08пс	1245	2,021	1,046	0,763	20	16,66	13,46	8,7	0,010	9,11	0,014	0,41	4,7
229	08пс	1215	2,125	1,113	0,812	20,95	17,07	12,79	8,96	0,014	9,01	0,014	0,05	0,6
230	08пс	1215	2,115	1,113	0,815	21,05	17,1	13,02	8,83	0,014	9,00	0,015	0,17	2,0
231	08пс	1215	2,116	1,114	0,814	20,9	17,22	13,1	8,69	0,012	9,02	0,015	0,33	3,8
232	08пс	1215	2,123	1,113	0,812	20,81	17,1	12,97	8,78	0,012	9,03	0,014	0,25	2,8
233	08пс	1215	2,124	1,115	0,814	20,9	17,09	13,15	8,74	0,012	9,03	0,014	0,29	3,3
234	08пс	1215	2,114	1,113	0,815	20,71	17,16	13,08	8,74	0,012	9,04	0,015	0,30	3,4
235	08пс	1215	2,125	1,114	0,814	20,81	17,01	13,05	8,69	0,012	9,03	0,014	0,34	3,9
236	08пс	1215	2,119	1,113	0,814	21,04	17,26	13,05	8,76	0,012	8,98	0,014	0,22	2,5
237	08пс	1215	2,115	1,115	0,814	20,95	17,04	13,94	8,76	0,012	9,02	0,014	0,26	2,9
238	08пс	1215	2,122	1,114	0,815	20,65	16,87	8,33	9,1	0,014	8,99	0,014	0,11	1,2
239	01ЮТ	1510	3,278	1,714	1,238	39,72	30,87	6,16	11,01	0,022	12,35	0,033	1,34	12,2
240	01ЮТ	1510	3,28	1,714	1,237	39,88	30,97	8,25	10,99	0,022	12,39	0,033	1,40	12,8
241	01ЮТ	1510	3,278	1,715	1,237	40,22	31,32	10,21	10,84	0,022	12,40	0,034	1,56	14,4
242	01ЮТ	1510	3,293	1,716	1,236	39,79	30,82	10,3	10,88	0,022	12,48	0,033	1,60	14,7
243	01ЮТ	1510	3,27	1,715	1,237	40,45	31,29	11,75	10,76	0,022	12,42	0,034	1,66	15,4
244	01ЮТ	1510	3,27	1,716	1,237	39,9	30,97	10,64	10,8	0,022	12,46	0,034	1,66	15,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
245	08Ю	1510	3,567	2,077	1,593	48,16	39,88	10,24	11,08	0,028	12,33	0,042	1,25	11,3
246	08Ю	1510	3,562	2,083	1,593	47,84	39,53	11,87	10,73	0,024	12,45	0,042	1,72	16,0
247	01ЮТ	1510	3,299	1,712	1,236	39,51	30,78	9,38	11,06	0,022	12,44	0,033	1,38	12,5
248	08Ю	1510	2,811	1,503	1,093	34,7	27,33	11,46	10,96	0,026	12,06	0,035	1,10	10,0
249	08Ю	1510	2,779	1,505	1,092	34,65	27,09	13,36	10,74	0,026	12,13	0,035	1,39	13,0
250	08Ю	1510	2,786	1,506	1,092	34,49	26,89	12,83	10,76	0,024	12,15	0,035	1,39	13,0
251	08Ю	1510	2,802	1,506	1,092	34,79	26,52	13,41	10,81	0,026	12,15	0,035	1,34	12,4
252	08Ю	1510	2,785	1,505	1,092	34,77	26,86	13,28	10,61	0,024	12,12	0,035	1,51	14,2
253	08Ю	1478	3,067	1,554	1,11	36,03	27,21	11,94	10,9	0,024	11,89	0,031	0,99	9,1
254	08Ю	1478	3,064	1,556	1,11	35,58	27,28	12,08	10,72	0,022	11,95	0,031	1,23	11,5
255	08Ю	1478	3,055	1,556	1,111	35,89	27,1	13,01	11,27	0,028	11,94	0,032	0,67	5,9
256	08Ю	1470	2,549	1,335	0,964	30,2	23,41	11,63	10,78	0,028	11,44	0,033	0,66	6,2
257	08Ю	1280	3,535	2,094	1,592	41,99	33,86	9,96	9,35	0,028	10,45	0,042	1,10	11,8
258	08Пс	1230	3,758	2,107	1,567	39,22	31,39	10,17	10,73	0,012	11,21	0,017	0,48	4,5
259	08Пс	1230	3,76	2,11	1,566	39,52	31,67	12,03	10,56	0,010	11,22	0,018	0,66	6,3
260	08Пс	1230	3,76	2,111	1,566	39,82	32,07	12,87	10,52	0,010	11,20	0,018	0,68	6,5
261	08Пс	1230	3,765	2,111	1,564	40,14	31,64	12,4	9,78	0,010	11,18	0,017	1,40	14,3
262	08Пс	1230	3,772	2,11	1,567	39,88	31,7	12,72	9,79	0,010	11,20	0,018	1,41	14,4
263	08Пс	1230	3,758	2,112	1,565	39,71	31,67	13,12	9,87	0,010	11,22	0,018	1,35	13,7
264	08Пс	1230	3,767	2,111	1,566	40,05	32,03	12,7	9,83	0,010	11,18	0,017	1,35	13,7
265	08Пс	1230	3,767	2,109	1,567	39,67	31,42	12,89	9,82	0,010	11,21	0,018	1,39	14,2
266	08Пс	1230	3,763	2,111	1,565	39,49	31,85	13,05	9,81	0,010	11,23	0,017	1,42	14,4
267	08Пс	1230	3,773	2,11	1,567	39,73	31,79	13,04	9,77	0,010	11,20	0,017	1,43	14,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
268	08пс	1230	3,772	2,111	1,565	39,68	31,56	13,06	9,81	0,010	11,22	0,017	1,41	14,3
269	08пс	1230	3,764	2,112	1,565	39,82	31,78	12,95	9,78	0,010	11,20	0,017	1,42	14,5
270	08пс	1230	3,764	2,108	1,566	39,74	31,68	12,2	10,05	0,010	11,18	0,017	1,13	11,2
271	08ю	1160	3,543	2,629	2,247	49,09	44,78	9,03	8,65	0,130	7,30	0,068	1,35	15,6
272	08ю	1160	4,552	2,358	1,678	41,06	31,55	8,91	9,21	0,018	10,38	0,031	1,17	12,7
273	08ю	1160	4,548	2,36	1,679	41,49	31,75	10,36	9,31	0,020	10,36	0,031	1,05	11,2
274	08ю	1160	4,548	2,36	1,678	41,64	31,75	10,96	9,26	0,018	10,35	0,031	1,09	11,8
275	08ю	1160	4,557	2,358	1,685	41,76	31,73	11,12	9,14	0,018	10,32	0,031	1,18	13,0
276	08ю	1160	4,56	2,36	1,678	41,62	31,85	11,41	9,26	0,018	10,35	0,031	1,09	11,8
277	08пс	1500	2,316	1,474	1,187	34,82	30,2	8,72	10,93	0,024	11,30	0,028	0,37	3,4
278	08ю	1480	3,022	1,637	1,216	37,43	29,57	11,96	11,97	0,038	11,85	0,037	0,12	1,0
279	08ю	1480	3,019	1,637	1,216	37,53	29,54	12,11	11,91	0,038	11,84	0,037	0,07	0,6
280	08пс	1460	3,547	2,047	1,578	45,79	38,83	11,85	11,97	0,012	12,89	0,022	0,92	7,7
281	08ю	1320	4,524	2,399	1,764	50,87	40,95	9,52	11,33	0,034	11,43	0,035	0,10	0,9
282	08ю	1565	5,077	3,173	2,539	62,33	52,19	6,34	14,33	0,048	14,43	0,049	0,10	0,7
283	08ю	1565	5,081	3,17	2,54	62,47	52,92	6,52	14,24	0,046	14,37	0,049	0,13	0,9
284	01юг	1480	5,343	2,779	2,043	62,68	50,82	8,27	13,3	0,030	13,66	0,034	0,36	2,7
285	01юг	1480	5,339	2,781	2,04	61,79	50,67	8,81	13,49	0,032	13,76	0,034	0,27	2,0
286	01юг	1480	5,344	2,78	2,043	62,78	51,73	8,63	13,51	0,032	13,65	0,034	0,14	1,0
287	01юг	1480	5,433	2,782	2,041	63,11	51,19	8,47	13,53	0,032	13,68	0,033	0,15	1,1
288	01юг	1480	5,341	2,783	2,041	61,91	52,46	8,75	13,45	0,032	13,73	0,034	0,28	2,1
289	01юг	1480	5,343	2,779	2,042	62,55	50,36	8,9	13,51	0,032	13,68	0,034	0,17	1,3
290	01юг	1480	5,331	2,782	2,042	60,93	50,85	8,68	13,51	0,032	13,81	0,034	0,30	2,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
291	01ЮТ	1480	5,449	2,779	2,04	62,54	51,76	8,89	13,63	0,032	13,71	0,033	0,08	0,6
292	01ЮТ	1480	5,346	2,78	2,036	61,17	50,33	8,19	13,76	0,034	13,80	0,034	0,04	0,3
293	01ЮТ	1480	5,338	2,782	2,046	61,38	50,88	7,39	13,5	0,032	13,73	0,034	0,23	1,7
294	01ЮТ	1480	5,374	2,828	2,077	61,23	48,6	6,36	13,15	0,028	13,94	0,035	0,79	6,0
295	01ЮТ	1480	5,321	2,843	2,077	61,55	49,36	6,34	12,55	0,022	13,96	0,035	1,41	11,2
296	01ЮТ	1425	4,069	2,005	1,407	43,37	32,66	7,52	11,9	0,024	12,21	0,027	0,31	2,6
297	01ЮТ	1425	4,085	2,005	1,412	43,98	33,25	10,27	11,98	0,026	12,20	0,028	0,22	1,8
298	01ЮТ	1425	4,087	2,004	1,411	43,41	32,89	9,82	11,8	0,024	12,24	0,028	0,44	3,8
299	01ЮТ	1425	4,077	2,006	1,406	43,13	32,76	8,01	12,05	0,026	12,24	0,027	0,19	1,5
300	01ЮТ	1000	4,564	2,326	1,685	35,64	28,51	4,93	8,64	0,030	8,78	0,031	0,14	1,7
301	01ЮТ	1000	4,559	2,326	1,685	35,77	28,56	5,34	8,73	0,030	8,78	0,031	0,05	0,5
302	01ЮТ	1000	4,034	1,997	1,418	30,26	24,26	6,74	8,53	0,028	8,53	0,028	0,00	0,1
303	01ЮТ	1000	3,232	1,582	1,127	24,55	19,28	9,58	8,04	0,028	7,99	0,029	0,05	0,6
304	01ЮТ	1000	3,219	1,586	1,126	24,55	19,36	9,88	7,91	0,028	8,01	0,029	0,10	1,2
305	SAE1006	1250	2,328	0,895	0,686	19,38	16,26	9,23	9,34	0,034	8,40	0,026	0,94	10,1
306	SAE1006	1250	2,33	0,893	0,692	19,44	16,27	12,63	8,91	0,032	8,41	0,028	0,50	5,6
307	SAE1006	1250	2,336	0,894	0,697	19,42	16,38	12,65	9,22	0,036	8,38	0,028	0,84	9,2
308	SAE1006	1250	2,336	0,894	0,7	19,28	16,4	13,35	8,94	0,034	8,38	0,028	0,56	6,3
309	SAE1006	1250	2,323	0,894	0,702	19,59	16,54	13,04	8,73	0,032	8,29	0,029	0,44	5,0
310	08ПС	1250	2,138	0,884	0,691	19,26	15,95	12,88	10,03	0,028	8,55	0,018	1,48	14,7
311	08ПС	1250	2,117	0,885	0,691	19,18	15,87	14,82	9,78	0,026	8,61	0,019	1,17	12,0
312	08ПС	1250	2,119	0,885	0,691	19,16	15,8	14,63	9,79	0,026	8,60	0,019	1,19	12,1
313	08ПС	1250	2,122	0,885	0,69	19,05	15,96	13,79	9,84	0,026	8,59	0,018	1,25	12,7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
314	08пс	1250	2,023	0,671	0,491	14,6	11,29	14,7	9,14	0,021	8,10	0,012	1,04	11,4
315	08пс	1250	1,805	0,591	0,439	12,95	10,32	16,77	9,53	0,019	7,96	0,013	1,57	16,5
316	SAE1006	1265	2,012	0,662	0,503	14,66	11,8	17,12	9,04	0,029	8,34	0,024	0,70	7,8
317	SAE1006	1265	1,997	0,663	0,503	14,62	11,83	17,06	9	0,028	8,34	0,024	0,66	7,4
318	SAE1006	1265	2,01	0,661	0,503	14,8	11,75	18,16	8,94	0,028	8,32	0,024	0,62	7,0
319	SAE1006	1265	2,009	0,663	0,504	14,78	11,76	18,22	8,88	0,028	8,33	0,024	0,55	6,2
320	SAE1006	1265	2,033	0,657	0,504	14,62	11,76	17,62	8,72	0,027	8,29	0,024	0,43	4,9
321	08пс	1245	2,046	0,762	0,587	16,52	13,82	16,9	9,52	0,020	8,48	0,014	1,04	10,9
322	01ЮТ	1510	3,278	1,238	0,972	30,87	25,36	7,99	11,59	0,032	10,98	0,027	0,61	5,3
323	01ЮТ	1510	3,28	1,237	0,974	30,97	25,49	10,69	11,29	0,030	11,00	0,027	0,29	2,6
324	01ЮТ	1510	3,278	1,237	0,976	31,32	25,65	13,2	10,9	0,028	10,99	0,028	0,09	0,8
325	01ЮТ	1510	3,293	1,236	0,976	30,82	25,78	13,29	10,81	0,026	11,03	0,028	0,22	2,1
326	01ЮТ	1510	3,27	1,237	0,977	31,29	25,97	15,18	10,65	0,026	11,00	0,029	0,35	3,3
327	01ЮТ	1510	3,27	1,237	0,975	30,97	25,4	13,77	10,7	0,024	11,05	0,028	0,35	3,3
328	08Ю	1510	3,567	1,593	1,301	39,88	32,9	12,75	11,3	0,048	10,71	0,039	0,59	5,2
329	08Ю	1510	3,562	1,593	1,302	39,53	33,93	14,73	10,88	0,042	10,70	0,040	0,18	1,7
330	01ЮТ	1510	3,299	1,236	0,972	30,78	25,49	12,2	11	0,026	11,05	0,027	0,05	0,4
331	08Ю	1510	2,811	1,093	0,862	27,33	21,79	14,76	11,38	0,042	10,56	0,033	0,82	7,2
332	08Ю	1510	2,779	1,092	0,865	27,09	22,44	17,14	11,08	0,040	10,53	0,034	0,55	5,0
333	08Ю	1510	2,786	1,092	0,863	26,89	21,66	16,49	11,09	0,038	10,62	0,034	0,47	4,2
334	08Ю	1510	2,802	1,092	0,864	26,52	21,79	17,24	11,04	0,038	10,66	0,034	0,38	3,5
335	08Ю	1510	2,785	1,092	0,864	26,86	22,76	17,04	10,86	0,038	10,53	0,034	0,33	3,1
336	08Ю	1478	3,067	1,11	0,861	27,21	21,09	15,64	11,3	0,036	10,60	0,031	0,70	6,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
337	08Ю	1478	3,064	1,11	0,864	27,28	22,31	15,8	11,09	0,036	10,48	0,031	0,61	5,5
338	08Ю	1478	3,055	1,111	0,865	27,1	21,59	17,03	11,62	0,040	10,57	0,031	1,05	9,0
339	08Ю	1470	2,549	0,964	0,755	23,41	18,6	15,08	11,01	0,040	10,15	0,032	0,86	7,9
340	08Ю	1280	3,535	1,592	1,302	33,86	28,65	12,41	9,2	0,042	8,96	0,039	0,24	2,6
341	08Пс	1230	3,758	1,567	1,249	31,39	26,26	13	10,61	0,022	10,16	0,018	0,45	4,3
342	08Пс	1230	3,76	1,566	1,256	31,67	26,62	15,31	10,2	0,020	10,11	0,019	0,09	0,9
343	08Пс	1230	3,76	1,566	1,255	32,07	25,74	16,36	10,09	0,018	10,11	0,019	0,02	0,2
344	08Пс	1230	3,765	1,564	1,255	31,64	25,83	15,75	9,8	0,014	10,13	0,019	0,33	3,3
345	08Пс	1230	3,772	1,567	1,254	31,7	26,04	16,17	9,81	0,014	10,15	0,019	0,34	3,5
346	08Пс	1230	3,758	1,565	1,253	31,67	25,92	16,65	9,77	0,014	10,14	0,019	0,37	3,8
347	08Пс	1230	3,767	1,566	1,254	32,03	25,96	16,14	9,83	0,016	10,11	0,019	0,28	2,8
348	08Пс	1230	3,767	1,567	1,253	31,42	26,11	16,4	9,78	0,014	10,17	0,018	0,39	4,0
349	08Пс	1230	3,763	1,565	1,252	31,85	25,83	16,58	9,69	0,014	10,13	0,019	0,44	4,5
350	08Пс	1230	3,773	1,567	1,254	31,79	25,85	16,58	9,65	0,012	10,14	0,018	0,49	5,1
351	08Пс	1230	3,772	1,565	1,251	31,56	25,9	16,6	9,69	0,012	10,16	0,018	0,47	4,8
352	08Пс	1230	3,764	1,565	1,253	31,78	25,96	16,45	9,66	0,014	10,12	0,018	0,46	4,7
353	08Пс	1230	3,764	1,566	1,254	31,68	25,93	15,51	9,98	0,016	10,12	0,018	0,14	1,4
354	08Ю	1160	4,552	1,678	1,301	31,55	25,29	11,67	8,94	0,028	9,08	0,030	0,14	1,5
355	08Ю	1160	4,548	1,679	1,31	31,75	25,92	13,51	8,97	0,030	9,01	0,030	0,04	0,5
356	08Ю	1160	4,548	1,678	1,313	31,75	25,16	14,25	8,78	0,028	9,02	0,031	0,24	2,7
357	08Ю	1160	4,557	1,685	1,312	31,73	25	14,42	8,81	0,028	9,09	0,030	0,28	3,2
358	08Ю	1160	4,56	1,678	1,311	31,85	25,46	14,82	8,68	0,028	9,02	0,031	0,34	3,9
359	08Пс	1500	2,316	1,187	0,991	30,2	28,54	10,56	10,66	0,028	10,40	0,025	0,26	2,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
360	08Ю	1480	3,022	1,216	0,957	29,57	24,83	15,32	11,4	0,044	10,52	0,034	0,88	7,7
361	08Ю	1480	3,019	1,216	0,957	29,54	25,31	15,5	11,35	0,042	10,49	0,034	0,86	7,6
362	08ПС	1460	3,547	1,578	1,281	38,83	36	14,68	11,16	0,014	11,60	0,021	0,44	4,0
363	08Ю	1320	4,524	1,764	1,392	40,95	34,88	12,18	10,6	0,042	9,89	0,033	0,71	6,7
364	08Ю	1565	5,077	2,539	2,144	52,19	43,42	7,68	13,72	0,064	12,62	0,044	1,10	8,0
365	08Ю	1565	5,081	2,54	2,147	52,92	47,2	7,89	13,52	0,064	12,44	0,044	1,08	8,0
366	01ЮТ	1480	5,343	2,043	1,622	50,82	44,24	10,63	12,1	0,030	11,93	0,028	0,17	1,4
367	01ЮТ	1480	5,339	2,04	1,611	50,67	42,08	11,34	12,15	0,028	12,04	0,028	0,11	0,9
368	01ЮТ	1480	5,344	2,043	1,612	51,73	43,24	11,09	12,06	0,028	11,94	0,028	0,12	1,0
369	01ЮТ	1480	5,433	2,041	1,616	51,19	46,53	10,82	11,93	0,026	11,91	0,027	0,02	0,2
370	01ЮТ	1480	5,341	2,041	1,619	52,46	47,16	11,18	11,7	0,028	11,74	0,028	0,04	0,3
371	01ЮТ	1480	5,343	2,042	1,62	50,36	44,99	11,36	11,82	0,026	11,96	0,028	0,14	1,1
372	01ЮТ	1480	5,331	2,042	1,617	50,85	44,18	11,1	11,84	0,026	11,94	0,028	0,10	0,9
373	01ЮТ	1480	5,449	2,04	1,622	51,76	44,25	11,38	11,75	0,026	11,87	0,027	0,12	1,0
374	01ЮТ	1480	5,346	2,036	1,609	50,33	45,75	10,5	12,02	0,028	11,95	0,027	0,07	0,6
375	01ЮТ	1480	5,338	2,046	1,608	50,88	45,81	9,53	12,01	0,028	11,97	0,027	0,04	0,3
376	01ЮТ	1480	5,374	2,077	1,636	48,6	40,71	8,53	12,17	0,026	12,38	0,028	0,21	1,7
377	01ЮТ	1480	5,321	2,077	1,646	49,36	41,12	8,48	11,26	0,018	12,21	0,028	0,95	8,5
378	01ЮТ	1425	4,069	1,407	1,087	32,66	26,14	10,33	10,73	0,022	10,87	0,023	0,14	1,3
379	01ЮТ	1425	4,085	1,412	1,089	33,25	25,68	14,06	10,6	0,020	10,94	0,024	0,34	3,2
380	01ЮТ	1425	4,087	1,411	1,092	32,89	26,5	13,47	10,42	0,020	10,91	0,024	0,49	4,7
381	01ЮТ	1425	4,077	1,406	1,085	32,76	25,86	11,05	10,65	0,020	10,88	0,023	0,23	2,1
382	01ЮТ	1000	4,564	1,685	1,301	28,51	22,85	6,67	7,78	0,024	7,80	0,024	0,02	0,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
383	01ЮТ	1000	4,559	1,685	1,304	28,56	23,68	7,24	7,56	0,022	7,77	0,025	0,21	2,8
384	01ЮТ	1000	4,034	1,418	1,088	24,26	18,94	9,25	7,31	0,020	7,51	0,023	0,20	2,8
385	01ЮТ	1000	3,232	1,127	0,867	19,28	15,43	13,06	6,95	0,022	7,26	0,024	0,31	4,5
386	01ЮТ	1000	3,219	1,126	0,872	19,36	15,5	13,44	6,7	0,020	7,23	0,024	0,53	7,8
387	SAE1006	1250	2,328	0,686	0,669	16,26	3,25	9,6	8,48	0,070	7,47	0,057	1,01	12,0
388	SAE1006	1250	2,33	0,692	0,67	16,27	3,34	13,46	9,47	0,066	8,66	0,062	0,81	8,6
389	SAE1006	1250	2,336	0,697	0,67	16,38	3,27	13,47	9,47	0,064	9,04	0,062	0,43	4,5
390	SAE1006	1250	2,336	0,7	0,669	16,4	3,35	14,15	9,47	0,062	9,44	0,062	0,03	0,3
391	SAE1006	1250	2,323	0,702	0,669	16,54	3,27	13,85	9,47	0,062	9,45	0,061	0,02	0,2
392	08Пс	1245	2,046	0,587	0,559	13,82	2,72	17,68	12,33	0,045	14,33	0,053	2,00	16,2
393	08Пс	1245	2,04	0,588	0,56	13,7	2,77	17,83	12,37	0,045	14,33	0,053	1,96	15,9
394	08Пс	1245	2,039	0,588	0,559	13,39	2,72	17,53	12,6	0,044	14,37	0,052	1,77	14,0
395	08Пс	1245	2,044	0,588	0,56	13,52	2,78	17,77	12,91	0,046	14,31	0,053	1,40	10,9
396	08Пс	1245	2,04	0,588	0,559	13,52	2,74	17,57	12,93	0,045	14,31	0,052	1,38	10,6
397	08Пс	1245	2,032	0,588	0,559	13,53	2,78	17,84	13,14	0,046	14,32	0,052	1,18	8,9
398	08Пс	1245	2,034	0,588	0,56	13,72	2,72	17,66	13,15	0,046	14,19	0,052	1,04	7,9
399	08Пс	1245	2,021	0,587	0,559	13,69	2,77	18,2	13,17	0,046	14,27	0,053	1,10	8,3
400	08Пс	1215	2,125	0,64	0,609	14,38	2,96	16,96	11,99	0,049	13,13	0,051	1,14	9,5
401	08Пс	1215	2,115	0,641	0,61	14,36	3,02	17,35	11,94	0,049	13,15	0,052	1,21	10,2
402	08Пс	1215	2,116	0,642	0,609	14,48	2,96	17,39	11,97	0,048	13,24	0,051	1,27	10,6
403	08Пс	1215	2,123	0,641	0,609	14,35	3,03	17,17	12,09	0,048	13,16	0,051	1,07	8,9
404	08Пс	1215	2,124	0,642	0,61	14,16	2,94	17,46	12,76	0,049	13,24	0,051	0,48	3,8
405	08Пс	1215	2,114	0,641	0,61	14,43	3,02	17,4	12,95	0,050	13,11	0,051	0,16	1,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
406	08пс	1215	2,125	0,641	0,609	14,55	2,95	17,34	13,06	0,050	13,15	0,051	0,09	0,7
407	08пс	1215	2,119	0,641	0,61	14,39	3,02	17,33	13,05	0,051	13,09	0,051	0,04	0,3
408	08пс	1215	2,115	0,641	0,609	14,25	2,95	18,48	13,12	0,051	13,35	0,052	0,23	1,7
409	08пс	1215	2,122	0,639	0,608	14,36	3,02	10,95	12,12	0,050	10,59	0,042	1,53	12,6
410	01ЮТ	1510	3,278	0,972	0,909	25,36	5,29	8,3	11,19	0,056	10,30	0,048	0,89	8,0
411	01ЮТ	1510	3,28	0,974	0,909	25,49	5,45	11,09	11,2	0,056	10,84	0,053	0,36	3,2
412	01ЮТ	1510	3,278	0,976	0,909	25,65	5,35	14,01	11,21	0,056	11,48	0,057	0,27	2,4
413	01ЮТ	1510	3,293	0,976	0,91	25,78	5,44	14,1	11,21	0,056	11,42	0,057	0,21	1,9
414	01ЮТ	1510	3,27	0,977	0,909	25,97	5,33	16,04	11,21	0,056	11,87	0,060	0,66	5,9
415	01ЮТ	1510	3,27	0,975	0,909	25,4	5,48	14,57	11,27	0,056	11,52	0,058	0,25	2,2
416	08Ю	1510	3,567	1,301	1,214	32,9	7,33	13,49	10,08	0,072	9,66	0,066	0,42	4,1
417	08Ю	1510	3,562	1,302	1,209	33,93	7,51	15,54	10,13	0,070	10,01	0,069	0,12	1,2
418	01ЮТ	1510	3,299	0,972	0,91	25,49	5,51	12,89	10,13	0,048	10,98	0,055	0,85	8,4
419	08Ю	1510	2,811	0,862	0,81	21,79	4,94	15,48	11,1	0,066	11,09	0,066	0,01	0,1
420	08Ю	1510	2,779	0,865	0,81	22,44	4,78	17,93	11,1	0,066	12,29	0,070	1,19	10,7
421	08Ю	1510	2,786	0,863	0,81	21,66	4,91	17,23	11,1	0,066	11,52	0,069	0,42	3,8
422	08Ю	1510	2,802	0,864	0,81	21,79	4,77	18,01	11,09	0,066	12,33	0,070	1,24	11,1
423	08Ю	1510	2,785	0,864	0,81	22,76	4,9	17,8	11,09	0,066	11,48	0,070	0,39	3,5
424	08Ю	1478	3,067	0,861	0,808	21,09	4,68	16,33	11,98	0,070	11,24	0,066	0,74	6,2
425	08Ю	1478	3,064	0,864	0,81	22,31	4,75	16,51	12,05	0,070	11,06	0,066	0,99	8,2
426	08Ю	1478	3,055	0,865	0,809	21,59	4,67	17,8	12,05	0,070	11,59	0,068	0,46	3,8
427	08Ю	1470	2,549	0,755	0,71	18,6	4,26	15,81	11,46	0,062	12,03	0,066	0,57	5,0
428	08Ю	1280	3,535	1,302	1,208	28,65	6,23	13,1	9,09	0,078	8,19	0,063	0,90	9,9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
429	08пс	1230	3,758	1,249	1,168	26,26	5,96	13,57	9,24	0,040	9,83	0,047	0,59	6,4
430	08пс	1230	3,76	1,256	1,17	26,62	5,81	15,96	9,22	0,038	10,26	0,050	1,04	11,2
431	08пс	1230	3,76	1,255	1,169	25,74	5,97	17,03	9,17	0,036	10,47	0,052	1,30	14,2
432	08пс	1230	3,765	1,255	1,17	25,83	5,83	16,4	9,19	0,036	10,36	0,051	1,17	12,7
433	08пс	1230	3,772	1,254	1,17	26,04	5,96	16,82	9,15	0,036	10,34	0,051	1,19	13,0
434	08пс	1230	3,758	1,253	1,169	25,92	5,84	17,31	9,19	0,038	10,42	0,052	1,23	13,4
435	08пс	1230	3,767	1,254	1,17	25,96	5,97	16,8	9,15	0,036	10,33	0,051	1,18	12,9
436	08пс	1230	3,767	1,253	1,17	26,11	5,84	17,06	9,18	0,038	10,32	0,052	1,14	12,4
437	08пс	1230	3,763	1,252	1,169	25,83	5,96	17,23	9,18	0,038	10,35	0,052	1,17	12,8
438	08ю	1160	3,543	1,998	1,845	42,31	9,18	10,69	7,81	0,120	6,57	0,072	1,24	15,8
439	08ю	1160	4,552	1,301	1,207	25,29	5,83	11,95	9,04	0,078	7,62	0,056	1,42	15,7
440	08ю	1160	4,548	1,31	1,21	25,92	5,94	14,21	9,12	0,078	7,88	0,059	1,24	13,6
441	08ю	1160	4,548	1,313	1,21	25,16	5,84	15	9,11	0,076	8,11	0,060	1,00	11,0
442	08ю	1160	4,557	1,312	1,21	25	5,95	15,15	9,19	0,076	8,10	0,060	1,09	11,9
443	08ю	1160	4,56	1,311	1,209	25,46	5,84	15,6	9,15	0,076	8,10	0,061	1,05	11,5
444	08ю	1480	3,022	0,957	0,91	24,83	5,59	16,15	11,08	0,084	9,60	0,069	1,48	13,4
445	08ю	1480	3,019	0,957	0,909	25,31	5,46	16,36	11,09	0,084	9,63	0,069	1,46	13,2
446	08пс	1460	3,547	1,281	1,216	36	7,51	15,53	11,12	0,060	10,58	0,053	0,54	4,8
447	08ю	1320	4,524	1,392	1,317	34,88	7,27	12,9	9,08	0,106	7,55	0,062	1,53	16,8
448	08ю	1565	5,077	2,144	2,017	43,42	12,38	7,92	10,32	0,078	9,65	0,060	0,67	6,5
449	08ю	1565	5,081	2,147	2,015	47,2	12,14	8,16	10,43	0,080	9,61	0,060	0,82	7,8
450	01ют	1480	5,343	1,622	1,526	44,24	9,43	10,98	10,61	0,074	9,35	0,052	1,26	11,8
451	01ют	1480	5,339	1,611	1,516	42,08	9,37	11,69	10,66	0,072	9,56	0,053	1,10	10,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
452	01ЮТ	1480	5,344	1,612	1,517	43,24	9,5	11,44	10,42	0,070	9,44	0,053	0,98	9,4
453	01ЮТ	1480	5,433	1,616	1,516	46,53	9,37	11,21	11,1	0,080	9,37	0,052	1,73	15,6
454	01ЮТ	1480	5,341	1,619	1,517	47,16	9,57	11,58	11,09	0,080	9,35	0,053	1,74	15,7
455	01ЮТ	1480	5,343	1,62	1,517	44,99	9,31	11,75	11,3	0,080	9,58	0,053	1,72	15,2
456	01ЮТ	1480	5,331	1,617	1,518	44,18	9,5	11,46	11,14	0,080	9,48	0,053	1,66	14,9
457	01ЮТ	1480	5,449	1,622	1,517	44,25	9,28	11,76	11,3	0,076	9,76	0,052	1,54	13,7
458	01ЮТ	1480	5,346	1,609	1,513	45,75	9,51	10,83	10,79	0,078	9,21	0,051	1,58	14,7
459	01ЮТ	1480	5,338	1,608	1,518	45,81	9,29	9,82	10,2	0,072	8,59	0,050	1,61	15,8
460	01ЮТ	1425	4,069	1,087	1,008	26,14	5,93	10,45	8,95	0,034	9,12	0,034	0,17	1,9
461	01ЮТ	1425	4,085	1,089	1,009	25,68	5,89	14,53	9,04	0,034	9,27	0,034	0,23	2,6
462	01ЮТ	1425	4,087	1,092	1,011	26,5	6,01	13,97	8,71	0,032	9,18	0,034	0,47	5,4
463	01ЮТ	1425	4,077	1,085	1,01	25,86	5,92	11,16	8,16	0,030	9,04	0,034	0,88	10,7
464	01ЮТ	1000	3,232	0,867	0,805	15,43	3,37	13,75	5,68	0,020	6,39	0,035	0,71	12,6
465	01ЮТ	1000	3,219	0,872	0,809	15,5	3,33	14,12	5,71	0,018	6,40	0,035	0,69	12,1
466	1пс	1050	3,013	3,013	2,32	19,6	34,751	5,65	9,71	0,075	9,96	0,086	0,25	2,6
467	1пс	1050	3,1	3,1	2,319	19,6	33,82	5,11	10,1	0,075	10,70	0,081	0,60	5,9
468	1пс	1050	3,004	3,004	2,324	19,6	34,643	5,28	9,54	0,079	9,84	0,087	0,30	3,2
469	08пс	1015	1,49	1,49	0,988	18,62	13,994	4,11	9,91	0,078	9,33	0,053	0,58	5,8
470	08пс	1015	1,488	1,488	0,99	18,62	14,034	3,39	9,51	0,069	9,27	0,053	0,24	2,5
471	08пс	1015	1,49	1,49	0,988	18,62	13,867	3,77	9,69	0,067	9,32	0,053	0,37	3,8
472	08пс	1080	2,319	2,319	1,57	19,6	23,334	5,34	11,13	0,058	11,66	0,058	0,53	4,7
473	08пс	1250	2,313	2,313	1,583	17,64	27,685	4,86	13,28	0,061	13,74	0,058	0,46	3,4
474	SAE1006	1167	2,209	2,209	1,554	19,6	24,755	5,28	11,78	0,115	11,66	0,089	0,12	1,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
475	SAE1006	1167	2,205	2,205	1,551	19,6	25,029	5,81	12,15	0,116	11,66	0,089	0,49	4,1
476	SAE1006	1167	2,21	2,21	1,55	19,6	24,99	4,37	11,97	0,115	11,66	0,088	0,31	2,6
477	SAE1006	991	5,543	5,543	4,313	19,41	62,671	5,96	11,36	0,138	10,61	0,108	0,75	6,6
478	SAE1006	991	5,566	5,566	4,312	19,6	63,445	4,64	10,78	0,128	10,70	0,107	0,08	0,8
479	SAE1006	991	5,591	5,591	4,321	19,6	61,828	4,86	11,38	0,132	10,83	0,106	0,55	4,8
480	01ЮТ	1000	2,803	2,803	1,974	19,6	27,567	5,59	8,63	0,159	9,74	0,147	1,11	12,9
481	01ЮТ	1000	2,788	2,788	1,971	19,6	27,381	5,7	8,7	0,159	9,66	0,148	0,96	11,0
482	01ЮТ	1000	2,776	2,776	1,993	19,6	28,018	5,67	7,91	0,152	9,24	0,151	1,33	16,8
483	01ЮТ	1420	4,035	4,035	2,874	19,6	56,575	5,2	14,7	0,182	15,04	0,150	0,34	2,3
484	01ЮТ	1420	4,029	4,029	2,85	19,6	55,929	4,47	14,9	0,182	15,26	0,147	0,36	2,4
485	01ЮТ	1420	4,048	4,048	2,89	19,6	57,555	4,48	14,48	0,180	14,88	0,149	0,40	2,8
486	01ЮТ	1435	5,321	5,321	3,934	19,11	80,595	3,82	15,87	0,165	14,68	0,159	1,19	7,5
487	01ЮТ	1435	5,245	5,245	3,878	19,44	78,39	4,1	15,4	0,161	14,66	0,159	0,74	4,8
488	1пс	1050	3,013	2,32	1,765	34,75	27,215	7,45	8,98	0,057	9,04	0,044	0,06	0,6
489	1пс	1050	3,1	2,319	1,769	33,82	28,253	6,65	8,97	0,054	9,10	0,042	0,13	1,4
490	1пс	1050	3,004	2,324	1,764	34,64	27,724	6,96	9,06	0,059	9,05	0,044	0,01	0,2
491	08пс	1080	2,319	1,57	1,06	23,33	17,679	8,13	10,27	0,033	8,94	0,016	1,33	13,0
492	08пс	1250	2,313	1,583	1,085	27,69	21,276	7,42	12,09	0,031	10,22	0,017	1,87	15,5
493	08пс	1200	2,318	1,576	1,062	25,55	19,326	7,84	11,02	0,031	9,92	0,015	1,10	10,0
494	SAE1006	1167	2,209	1,554	1,084	24,75	19,522	7,84	10,97	0,055	9,78	0,037	1,19	10,9
495	SAE1006	1167	2,205	1,551	1,083	25,03	18,973	8,68	11,01	0,056	9,76	0,037	1,25	11,3
496	SAE1006	1167	2,21	1,55	1,083	24,99	19,061	6,48	11,05	0,057	9,74	0,037	1,31	11,9
497	SAE1006	991	5,543	4,313	3,345	62,67	53,038	7,8	10,82	0,080	9,54	0,056	1,28	11,8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
498	SAE1006	991	5,566	4,312	3,356	63,45	52,156	6,08	10,56	0,084	9,47	0,056	1,09	10,3
499	SAE1006	991	5,591	4,321	3,363	61,83	52,234	6,34	10,66	0,084	9,57	0,056	1,09	10,2
500	01ЮТ	1000	2,803	1,974	1,334	27,57	22,726	8,43	8,12	0,047	8,87	0,052	0,75	9,3
501	01ЮТ	1000	2,788	1,971	1,34	27,38	22,226	8,61	8,37	0,052	8,87	0,053	0,50	6,0
502	01ЮТ	1000	2,776	1,993	1,402	28,02	20,786	8,07	7,47	0,045	8,64	0,058	1,17	15,7
503	01ЮТ	1420	4,035	2,874	2,03	56,58	43,728	7,53	13,03	0,048	13,41	0,058	0,38	2,9
504	01ЮТ	1420	4,029	2,85	2,012	55,93	42,434	6,48	13,15	0,060	13,43	0,057	0,28	2,1
505	01ЮТ	1420	4,048	2,89	2,057	57,56	43,551	6,63	12,4	0,054	13,23	0,059	0,83	6,7
506	01ЮТ	1435	5,321	3,934	2,861	80,6	60,388	5,52	14,34	0,070	13,98	0,067	0,36	2,5
507	01ЮТ	1435	5,245	3,878	2,836	78,39	61,407	5,79	14,11	0,081	13,86	0,068	0,25	1,8
508	1пс	1050	3,013	1,765	1,347	27,21	24,06	10,09	8,53	0,052	8,56	0,031	0,03	0,4
509	1пс	1050	3,1	1,769	1,348	28,25	24,127	9,04	8,51	0,050	8,50	0,030	0,01	0,2
510	1пс	1050	3,004	1,764	1,348	27,72	24,451	9,43	8,62	0,042	8,48	0,031	0,14	1,7
511	08пс	1015	1,49	0,645	0,44	10,06	7,6498	9,93	7,14	0,015	6,15	0,006	0,99	13,9
512	08пс	1015	1,488	0,65	0,443	10,08	7,8499	8,04	7,12	0,015	6,14	0,005	0,98	13,8
513	08пс	1015	1,49	0,647	0,44	10,2	7,4806	8,96	6,86	0,013	6,11	0,005	0,75	10,9
514	08пс	1080	2,319	1,06	0,722	17,68	13,638	11,43	9,01	0,027	7,87	0,008	1,14	12,7
515	08пс	1250	2,313	1,085	0,743	21,28	13,4	10,72	10,37	0,020	9,06	0,007	1,31	12,7
516	08пс	1200	2,318	1,062	0,722	19,33	14,8	11,63	9,05	0,013	8,70	0,007	0,35	3,9
517	SAE1006	1167	2,209	1,084	0,77	19,52	15,621	11,46	8,91	0,041	8,35	0,024	0,56	6,2
518	SAE1006	1167	2,205	1,083	0,772	18,97	15,278	12,62	8,73	0,037	8,61	0,024	0,12	1,4
519	SAE1006	1167	2,21	1,083	0,77	19,06	15,298	9,51	8,98	0,040	8,41	0,024	0,57	6,3
520	SAE1006	991	5,543	3,345	2,589	53,04	45,569	10,04	9,02	0,051	9,15	0,039	0,13	1,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
521	SAE1006	991	5,566	3,356	2,595	52,16	45,971	7,82	9,05	0,048	9,22	0,039	0,17	1,8
522	SAE1006	991	5,591	3,363	2,588	52,23	45,726	8,19	9,1	0,046	9,26	0,038	0,16	1,8
523	01ЮТ	1000	2,803	1,334	0,992	22,73	17,101	11,96	6,69	0,025	7,38	0,031	0,69	10,3
524	01ЮТ	1000	2,788	1,34	0,975	22,23	16,101	12,32	6,84	0,023	7,55	0,029	0,71	10,4
525	01ЮТ	1000	2,776	1,402	1,004	20,79	16,964	11,98	6,97	0,025	7,87	0,030	0,90	12,9
526	01ЮТ	1420	4,035	2,03	1,451	43,73	34,584	10,97	12,11	0,037	12,19	0,030	0,08	0,6
527	01ЮТ	1420	4,029	2,012	1,413	42,43	32,575	9,51	12,08	0,031	12,26	0,028	0,18	1,5
528	01ЮТ	1420	4,048	2,057	1,444	43,55	32,859	9,55	10,96	0,020	12,25	0,028	1,29	11,8
529	01ЮТ	1435	5,321	2,861	2,093	60,39	49,5	7,61	13,47	0,044	13,52	0,036	0,05	0,4
530	01ЮТ	1435	5,245	2,836	2,086	61,41	49,861	8,03	13,23	0,046	13,30	0,037	0,07	0,6
531	1пс	1050	3,013	1,347	1,069	24,06	20,335	13	7,92	0,055	7,55	0,028	0,37	4,7
532	1пс	1050	3,1	1,348	1,075	24,13	20,462	11,63	7,71	0,052	7,51	0,028	0,20	2,6
533	1пс	1050	3,004	1,348	1,077	24,45	20,502	12,1	7,88	0,057	7,44	0,028	0,44	5,6
534	08пс	1250	2,313	0,743	0,54	13,4	12,054	15,25	10,07	0,025	8,78	0,008	1,29	12,8
535	08пс	1200	2,318	0,722	0,537	14,8	11,593	15,82	9,26	0,023	8,21	0,011	1,05	11,3
536	SAE1006	1167	2,209	0,77	0,552	15,62	11,731	15,74	8,56	0,038	7,35	0,018	1,21	14,1
537	SAE1006	1167	2,205	0,772	0,552	15,28	11,731	17,44	8,38	0,037	7,43	0,018	0,95	11,3
538	SAE1006	1167	2,21	0,77	0,552	15,3	11,682	13,1	8,51	0,037	7,39	0,018	1,12	13,2
539	SAE1006	991	5,543	2,589	2,016	45,57	39,455	13,22	8,02	0,045	8,33	0,031	0,31	3,9
540	SAE1006	991	5,566	2,595	2,02	45,97	37,936	10,31	8,11	0,046	8,31	0,031	0,20	2,5
541	SAE1006	991	5,591	2,588	2,062	45,73	38,543	10,55	7,69	0,042	8,13	0,032	0,44	5,7
542	01ЮТ	1000	2,776	1,004	0,745	16,96	13,553	16,36	6,7	0,015	6,85	0,020	0,15	2,2
543	01ЮТ	1420	4,035	1,451	1,068	34,58	27,538	14,89	10,11	0,027	10,94	0,021	0,83	8,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
544	01ЮТ	1420	4,029	1,413	1,073	32,57	27,087	12,66	10,07	0,027	10,87	0,022	0,80	8,0
545	01ЮТ	1420	4,048	1,444	1,071	32,86	25,882	12,58	10,67	0,029	10,98	0,020	0,31	2,9
546	01ЮТ	1435	5,321	2,093	1,598	49,5	41,905	9,83	11,1	0,031	12,07	0,026	0,97	8,7
547	01ЮТ	1435	5,245	2,086	1,607	49,86	41,66	10,31	10,73	0,029	11,92	0,027	1,19	11,1
548	1пс	1050	3,013	1,069	1,007	20,34	4,361	13,79	7,18	0,073	6,30	0,048	0,88	12,3
549	1пс	1050	3,1	1,075	1,006	20,46	4,3218	12,48	8,18	0,071	6,93	0,046	1,25	15,2
550	1пс	1050	3,004	1,077	1,009	20,5	4,3022	12,92	8,54	0,073	7,38	0,046	1,16	13,6
551	08пс	1015	1,49	0,301	0,289	5,625	1,2153	15,41	10,64	0,022	11,97	0,028	1,33	12,5
552	08пс	1015	1,488	0,307	0,292	5,645	1,2152	12,68	10,85	0,023	11,88	0,027	1,03	9,5
553	08пс	1015	1,49	0,306	0,29	5,713	1,2054	14,13	10,85	0,021	11,91	0,026	1,06	9,7
554	08пс	1080	2,319	0,541	0,508	10,68	2,0579	17,18	10,29	0,034	9,06	0,029	1,23	11,9
555	08пс	1250	2,313	0,54	0,508	12,05	2,3813	16	12,09	0,037	10,35	0,027	1,74	14,4
556	08пс	1200	2,318	0,537	0,507	11,59	2,1756	16,7	11,32	0,034	9,83	0,028	1,49	13,1
557	SAE1006	991	5,543	2,016	1,894	39,45	7,3696	14,02	6,31	0,103	5,47	0,052	0,84	13,2
558	SAE1006	991	5,566	2,02	1,89	37,94	7,1932	10,72	6,5	0,099	5,65	0,049	0,85	13,1
559	SAE1006	991	5,591	2,062	1,889	38,54	7,1834	11,13	8,39	0,113	7,28	0,047	1,11	13,3
560	01ЮТ	1000	2,803	0,742	0,701	13,7	2,8126	16,35	5,62	0,027	6,12	0,036	0,50	8,9
561	01ЮТ	1000	2,788	0,741	0,697	13,75	2,8322	16,73	5,86	0,024	6,19	0,035	0,33	5,7
562	01ЮТ	1000	2,776	0,745	0,699	13,55	2,7734	17,02	5,67	0,019	6,19	0,034	0,52	9,1
563	01ЮТ	1420	4,035	1,068	1,008	27,54	5,7526	15,5	10,86	0,073	9,26	0,047	1,60	14,7
564	01ЮТ	1420	4,029	1,073	1,007	27,09	5,8212	13,25	11,15	0,072	9,32	0,044	1,83	16,4
565	01ЮТ	1420	4,048	1,071	1,007	25,88	5,7232	13,41	12,68	0,071	11,56	0,042	1,12	8,8
566	01ЮТ	1435	5,321	1,598	1,499	41,9	8,4084	10,26	10,89	0,075	9,40	0,045	1,49	13,7