РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ С УЧЕТОМ ЕГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ

А. С. О. АЛЬ-КХУЗАИ, аспирант;

В. В. ШИРОКОВ, канд. техн. наук, доцент, shirokovvv@susu.ru;

А. В. ВЫДРИН, д-р техн. наук, профессор

(Южно-Уральский государственный университет, Россия, г. Челябинск)

Аннотация. Величина сопротивления металла пластической деформации является важным параметром при проектировании технологического оборудования и режимов пластической деформации, поскольку она во многом определяет энергосиловые параметры процесса прокатки. Обычно ее представляют в виде зависимости от скорости деформации, величины накопленной деформации и температуры, при которой происходит деформирование. Применение таких зависимостей обычно дает удовлетворительное совпадение с опытными данными, однако совершенствование процессов прокатки предъявляет повышенные требования к точности расчетов параметров деформации, в том числе величины сопротивления металла пластической деформации. При производстве металлопроката и труб широкое распространение получили процессы, в ходе которых металл подвергается многократной деформации. Одним из путей повышения точности расчетов величины сопротивления металла деформации представляется учет разупрочнения металла между их этапами. Приведены расчеты изменения величины сопротивления металла с учетом и без учета разупрочнения при прокатке труб на оправке в четырех клетях непрерывного стана. Показано, что разупрочнение может оказывать значительное влияние на величину сопротивления металла пластической деформации. Учет разупрочнения с учетом различий процессов, протекающих как по периметру калибра, так и по длине стана, дает верную картину напряженно-деформированного состояния металла.

Ключевые слова: сопротивление металла пластической деформации, непрерывная прокатка, разупрочнение металла при прокатке труб, напряженно-деформированное состояние.

Ссылка для цитирования: Аль-Кхузаи А.С.О., Широков В.В., Выдрин А.В. Расчет сопротивления металла пластической деформации с учетом его разупрочнения при непрерывной прокатке // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 3. С. 258–262.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-3-258-262

CALCULATION OF METAL RESISTANCE AGAINST PLASTIC DEFORMATION ACCOUNTING ITS SOFTENING DURING CONTINUOUS ROLLING

A. S. O. AL'-KKHUZAI, postgraduate;

V. V. SHIROKOV, PhD (Tech.), Prof. Ass., shirokovvv@susu.ru;

A. V. VYDRIN, HD (Tech.), Prof.

(South-Ural State University, Russia, Chelyabinsk)

Abstract. The value of metal resistance against plastic deformation is an important parameter at designing of technological equipment and plastic deformation modes, since it determines considerably energy and power parameters during rolling process. Usually it is represented as dependence on deformation rate, value of accumulated deformation and temperature at which the deformation takes place. Application of such dependences usually gives a satisfactory coincidence with experimental data. However, the perfection of the rolling processes results in increase requirements to the calculation accuracy of the deformation parameters, including the value of metal resistance against plastic deformation. At the production of metal products and pipes, the processes in which a metal is subjected to multiple deformation, are widely used. One of the ways to increase the calculation accuracy of the value of metal resistance against deformation is the accounting of metal softening between their stages. Calculation of variation of the metal resistance value presented, accounting and without accounting the softening during pipes rolling at a mandrel in a four-stand continuous mill. It was shown that the softening could have a significant influence on the value of metal resistance against plastic deformation. Accounting the softening and various processes taking place along both the roller pass perimeter and the mill length, gives an actual picture of stress and deformation state of metal.

Key words: metal resistance against plastic deformation, continuous rolling, metal softening during pipes rolling, stress and deformation state.

For citation: Al'-Kkhuzai A.S.O., Shirokov V.V., Vydrin A.V. Calculation of metal resistance against plastic deformation accounting its softening during continuous rolling. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 3, pp. 258–262. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-3-258-262

Величина сопротивления металла пластической деформации является важным параметром при проектировании технологического оборудования прокатных цехов и режимов деформации металлов. Именно она во многом определяет энергосиловые параметры процесса деформации. На сегодняшний день разработано большое количество зависимостей для определения сопротивления металла пластической деформации [1–4]. Эти зависимости различаются между собой как по виду функции, так и по наборам независимых переменных. Наибольшее распространение при расчете процессов обработки металлов давлением получили зависимости, в которых величину сопротивления деформации представляют в виде функции от таких характеристик процесса, как скорость деформации, величина накопленной деформации и температура, при которой происходит деформирование. Для определения численных значений входящих в них коэффициентов используют либо литературные источники и справочники [3], либо проводят серии испытаний. При этом способ нагружения, скорость, величину деформации образца и другие параметры эксперимента выбирают исходя из особенностей напряженно-деформированного состояния металла при реальных технологических операциях. Наиболее распространенными являются испытания на растяжение, сжатие, а также кручение, проводимые на пластометрах различной конструкции [1]. К сожалению, из-за большого числа марок стали, применяемых в промышленности, поиск численных значений коэффициентов по справочным данным для нужной стали может быть затруднительным. Результаты расчетов по таким зависимостям обычно

дают удовлетворительное совпадение с опытными данными, но возможны и существенные (до 50 %) расхождения [5].

Необходимость постоянно увеличивать производительность процессов прокатки, а также качество продукции заставляет повышать точность расчетов. Одним из путей повышения точности расчетов представляется уточнение существующих или вывод новых зависимостей благодаря применению более точной и совершенной измерительной техники и испытательного оборудования. Вторым, не менее важным, направлением работы по повышению точности расчетов можно назвать учет разупрочнения металла, которое может протекать как в процессе деформации, так и между этапами деформирования. Это направление является в настоящее время особенно актуальным, так как при производстве металлопродукции, и труб в частности, широкое распространение получили процессы, в ходе которых металл подвергается многократной деформации. При непрерывной прокатке металл трубы последовательно деформируется в каждой из клеток стана, и хотя время между этапами деформации достаточно мало, его может быть достаточно для частичного разупрочнения металла.

В данной работе в качестве примера приведен расчет влияния разупрочнения на изменение величины сопротивления металла пластической деформации при прокатке трубы на оправке в четырех клетях непрерывного стана. В качестве исходных данных о процессе прокатки были использованы результаты моделирования процесса непрерывной прокатки, выполненного в работе [6].

Исходные данные

Зависимость и методика определения величины сопротивления металла пластической деформации с учетом разупрочнения предложена в работе [7]. Полученная на ее основе рекуррентная формула приведена в работе [8]. Для облегчения расчета весь процесс деформирования разбивается на отдельные шаги, и для i -го произвольного шага деформирования величина сопротивления металла пластической деформации будет равна:

$$\sigma_{si} = \sigma_{s0} + \Delta\sigma_{s(i-1)} + a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) - a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{k}\right) \right), \quad (1)$$

где σ_{s0} — величина сопротивления металла пластической деформации до начала деформации; $\Delta\sigma_{s(i-1)}$ — изменение величины сопротивления деформации по отношению к предыдущему

шагу; Λ — величина деформации на i -м шаге; k — коэффициент разупрочнения металла; a и n — коэффициенты, учитывающие упрочнение металла в процессе деформации согласно выражению [9]:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + a\Lambda^n. \quad (2)$$

Из анализа выражения (1) видно, что оно учитывает разупрочнение, вызванное деформацией только на текущем шаге, и при отсутствии деформации (во время паузы) величина сопротивления металла пластической деформации меняться не будет. Поэтому для расчета сопротивления деформации при прокатке данная формула должна быть преобразована так, чтобы величина разупрочнения на каждом шаге определялась не только величиной деформации на этом шаге, но и деформацией, накопленной металлом на предыдущих шагах:

$$\sigma_{si} = \sigma_{s(i-1)} + \sigma_{si}^+ - \sigma_{si}^- = \sigma_{s0} + \Delta\sigma_{s(i-1)} + a(\Lambda_i^n - \Lambda_{i-1}^n) - a\Lambda_i^n \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{k}\right)\right). \quad (3)$$

Для определения значения коэффициентов, входящих в выражение (3), проведены испытания на горячее сжатие и растяжение образцов из стали 09Г2С. Эта сталь широко применяется при производстве бесшовных труб нефтегазового сортамента. Испытания проводили на комплексе Gleeble 3800. Значения коэффициентов для стали 09Г2С при температуре 1200 °С представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ С УЧЕТОМ РАЗУПРОЧНЕНИЯ

TABLE 1. COEFFICIENTS FOR CALCULATION OF DEFORMATION RESISTANCE ACCOUNTING SOFTENING

Сталь	Коэффициент			
	σ_{s0}	k	a	n
09Г2С	60,357	0,015384	843,6	0,5851

Для сравнения была выбрана методика расчета величины сопротивления металла пластической деформации Л.В. Андреюка и Г.Г. Тюленева [10]. Согласно данной работе, выражение для расчета величины сопротивления деформации имеет вид:

$$\sigma_s = S\sigma_{s0}u^b(10\Lambda)^c\left(\frac{t^\circ}{1000}\right)^{-d}, \quad (4)$$

где u — скорость деформации; t° — температура металла; S , b , c , d — эмпирические коэффициенты.

Методика Л.В. Андреюка и Г.Г. Тюленева была выбрана как имеющая ряд положительных оценок [11, 12] и охватывающая большое количество марок стали. В частности, авторы работы [11] существенно расширили границы применения этой методики, применив ее для обработки экспериментальных данных по сопротивлению деформации более 140 сталей, полученных в исследовательском центре концерна “Витковице”, Чехия. Значения коэффициентов для расчета величины сопротивления пластической деформации по методике Андреюка–Тюленева для стали 09Г2С приведены в табл. 2 [2].

ТАБЛИЦА 2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПО МЕТОДИКЕ АНДРЕЮКА–ТЮЛЕНЕВА

TABLE 2. COEFFICIENTS FOR CALCULATION OF DEFORMATION RESISTANCE ACCORDING TO ANDREYUK–TYULENEV METHODOLOGY

Сталь	Коэффициент				
	S	σ_{s0}	b	c	d
09Г2С	1,0	84,246	0,127	0,1776	3,511

Сравнение двух приведенных выше методик было выполнено для условий непрерывной прокатки труб на оправке, как наиболее производительного и перспективного способа производства бесшовных труб. Необходимые для расчета величины приняты по данным, приведенным в работе [6], и представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. УСЛОВИЯ ДЕФОРМАЦИИ РАССМАТРИВАЕМОГО ЭЛЕМЕНТАРНОГО ОБЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКЕ

TABLE 3. DEFORMATION CONDITIONS OF THE CONSIDERED ELEMENTARY METAL VOLUME AT CONTINUOUS ROLLING

Номер клетки/ межклетевой промежуток	Время, с	Пластическая деформация	Скорость деформации, 1/с
1	0,175667	0,960614	5,468391
1–2	0,532829	0,001418	0,002661
2	0,040365	0,134368	3,328851
2–3	0,356985	0,000185	0,000519
3	0,051281	0,148401	2,893854
3–4	0,290423	0,003743	0,012887
4	0,034087	0,056446	1,655924

Характерной особенностью непрерывной прокатки труб на оправке является то, что в силу конструктивных особенностей станов [13] каждый элементарный объем металла последовательно оказывается то в вершине калибра, где подвергается значительной пластической деформацией, то в выпуске, где деформация существенно меньше. При этом он некоторое время находится в межклетевом промежутке, где деформация относительно мала, или может вообще отсутствовать. Таким образом, для каждого элементарного объема металла периоды интенсивной пластической деформации сменяются периодами “отдыха”, когда деформация незначительна и возможно протекание процессов разупрочнения.

Результаты расчета

Для расчета величины сопротивления металла пластической деформации интервалы времени (см. табл. 3), в которые металл нахо-

дится в очаге деформации или в межклетевом промежутке, разбивались на более мелкие, внутри которых величина пластической дефор-

магии и скорость деформации считались постоянными и равными среднему значению, указанному в таблице. Результаты расчета представлены в виде графиков (см. рисунок).

Изменение величины сопротивления металла пластической деформации в процессе прокатки (вертикальными линиями показаны моменты входа-выхода из очагов деформации)

Change of metal resistance against plastic deformation during rolling (vertical lines show the moments of entry and exit from the deformation zones)

Как видно из графиков изменения величины сопротивления металла пластической деформации (см. рисунок), сравниваемые методики дают существенно различный результат расчетов, за исключением начальных и конечных значений. И первой причиной этого, безусловно, является различный набор учитываемых факторов. Методика Андреюка–Тюленева не учитывает процессы разупрочнения и, следовательно, не может быть использована для расчета при многоступенчатой деформации. В частности, это видно по результатам расчета для первой клетки. Методика, построенная с учетом разупрочнения,

описывает кривую с максимумом, чего степенная зависимость Андреюка–Тюленева описать в принципе не может. Кроме того, возникает вопрос корректного учета истории нагружения, поскольку при простом суммировании упрочнения металла на каждом шаге деформации получится неограниченный рост величины сопротивления пластической деформации, что противоречит экспериментальным данным. Вторым значимым фактором может являться место отбора металла образцов, использовавшихся для экспериментального определения значений коэффициентов. Образцы для исследования, проведенного авторами статьи, изготавливались из гильз, прошито-ных на стане винтовой прокатки, т. е. металл до испытаний подвергался деформации, что могло повлиять на его структуру и свойства.

Если сравнивать результаты расчета только на качественном уровне, то можно заметить, что по результатам расчета по формуле (3) нельзя определить, находится ли рассматриваемый элементарный объем металла в данный момент в вершине или в выпуске калибра, равно как и насколько данная клетка удалена от начала стана. Хотя условия деформирования в вершине и в выпуске калибра, а также по мере удаления клетки от начала стана значительно меняются (см. табл. 3).

При этом результаты расчета по формуле (3) дают качественно верные зависимости. Максимальному обжатию в первой клетке соответствует максимальное значение величины сопротивления пластической деформации. А уменьшение величины обжатия от первой клетки к последующим дает падающий график значения величины сопротивления пластической деформации (за исключением третьей клетки, где рассматриваемый объем металла оказался в вершине калибра).

Выводы

Применение различных методик для расчета величины сопротивления пластической деформации может давать существенно различные результаты даже при использовании эмпирических коэффициентов, полученных для одной марки стали. Результаты расчета по формуле (3) точнее учитывают различия процессов деформирования металла как по поперечному сечению трубы (вершина – выпуск калибра), так и по длине стана (уменьшение величины обжатия на выходе из стана).

При расчете энергосиловых параметров непрерывной прокатки следует учитывать процессы разупрочнения.

Предложенная рекуррентная формула (3) дает возможность описания зависимостей различного вида, а именно: монотонное увеличение сопротивления металла пластической деформации, упрочнение металла в начале очага деформации с последующим разупрочнением, упрочнение – разупрочнение – упрочнение и т. п. Причем такой характер может быть не только в линии прокатного стана, но и в пределах очага деформации одной клетки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд. / Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1982. — 360 с.
2. Остапенко А.Л., Забира Л.А. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2009. № 3 (1311). С. 54–79.
3. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. — М.: Металлургия, 1973. — 224 с.
4. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник. — М.: Металлургия, 1983. — 352 с.
5. Остапенко А.Л., Руденко Е.А., Курдюкова Л.А. Оценка влияния методики определения сопротивления деформации на погрешность расчета силы горячей прокатки полос и листов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2013. № 6 (1362). С. 38–44.
6. Аль-Кхузаи А.С.О., Широков В.В., Выдрин А.В. Определение диапазона изменения параметров напряженно-деформированного состояния металла при непрерывной прокатке труб // Вестник ЮУрГУ. Серия “Металлургия”. 2019. Т. 19. № 1. С. 74–79. Doi: 10.14529/met190109.
7. Выдрин А.В. Универсальная феноменологическая модель сопротивления металла пластическому деформированию // Изв. вузов. Черная металлургия. 2000. № 11. С. 28–31.
8. Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В. Анализ возможности применения универсальной феноменологической модели сопротивления металла пластической деформации // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 27. С. 60–68.
9. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. — М.: Металлургия, 1986. — 688 с.
10. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г. Аналитическая зависимость сопротивления деформации металла от температуры, скорости и степени деформации // Сталь. 1972. № 9. С. 825–828.
11. Гайдук М., Конвичный И. Силовые условия при горячей прокатке стали. — М.: Металлургия, 1985. — 208 с.
12. Анализ формул для расчета сопротивления металла деформации при горячей прокатке листов / А.И. Стариков, Г.А. Медведев, А.И. Титов и др. // Труды Седьмого конгресса прокатчиков. — М.: МОО “Объединение прокатчиков”. 2007. Т. 2. С. 616–618.
13. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. — М.: Интернет Инжиниринг, 2001. — 608 с.

Поступила 13 января 2020 г.

REFERENCES

1. Hensel A., Spittel T. Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren. Leipzig: Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie, 1978, 528 p.
2. Ostapenko A.L., Zabira L.A. Deformation resistance of steels during rolling and methods of its calculation. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2009, no. 3 (1311), pp. 54–79. (In Russ.).
3. Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys during pressure processing]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.).
4. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivleniye plasticheskoi deformatsii metallov i splavov* [Resistance against plastic deformation of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p. (In Russ.).
5. Ostapenko A.L., Rudenko E.A., Kurdyukova L.A. Evaluation of the influence of the method for determining the strain resistance on the error in calculating the hot rolling force of strips and sheets. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2013, no. 6 (1362), pp. 38–44. (In Russ.).
6. Al'-Kkhuzai A.S.O., Shirokov V.V., Vydrin A.V. Determination of the Range of Variation of the Parameters of the Stress-Strain State of the Metal during Continuous Pipe Rolling. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 74–79. doi: 10.14529/met190109. (In Russ.).
7. Vydrin A.V. A universal phenomenological model of metal resistance against plastic deformation. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2000, no. 11, pp. 28–31. (In Russ.).
8. Al'-Kkhuzai A.S.O., Vydrin A. V., Shirokov V.V. Analysis of the possibility of using a universal phenomenological model of the resistance of a metal to plastic deformation. *Modelirovaniye i razvitiye protsessov OMD*, 2018, no. 27, pp. 60–68. (In Russ.).
9. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metals forming]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 668 p. (In Russ.).
10. Andreyuk L.V., Tyulenev G.G. Analytical dependence of metal deformation resistance on temperature, speed and degree of deformation. *Stal'*, 1972, no. 9, pp. 825–828. (In Russ.).
11. Gaiduk M., Konvichnyi I. *Silovye usloviya pri goryachei prokatke stali* [Force conditions during hot rolling of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 208 p. (In Russ.).
12. Starikov A.I., Medvedev G.A., Titov A.I. etc. *Analiz formul dlya rascheta soprotivleniya metalla deformatsii pri goryachei prokatke listov* [Analysis of formulas for calculating the resistance of metal to deformation during hot rolling of sheets]. *Trudy Sed'mogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the Seventh Congress of Mill man's]. Moscow: MOO “Ob”edineniye prokatchikov”, 2007, vol. 2, pp. 616–618. (In Russ.).
13. Osadchii V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovaniye trubnogo proizvodstva* [Technology and equipment for pipe production]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2001, 608 p. (In Russ.).

Received January 13, 2020