

¹Яковченко А. В., ²Денищенко П. Н., ^{2,*}Чумак Н. Ю.

¹Донецкий национальный технический университет,

²Донбасский государственный технический университет

*E-mail: nikolay31302@gmail.com

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ О НАПРЯЖЕНИИ ТЕЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ КРЕПИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Повышение несущей способности профилей для крепи горных выработок имеет высокую актуальность. На практике их получают горячей прокаткой в основном из конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5 нормальной прочности с пределом текучести до 300 МПа. Решена задача выбора для указанных профилей конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД высокой прочности, имеющей предел текучести не менее 450 МПа, и разработки для нее базы цифровой информации о напряжении течения металла при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с⁻¹ и температуры в диапазоне 900–1200 °С.

Ключевые слова: профили для крепи горных выработок, конструкционная низколегированная сталь; напряжение течения металла, горячая пластическая деформация, степень деформации, скорость деформации, температура металла.

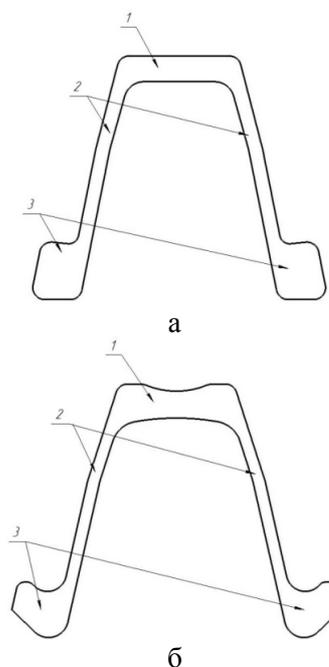
Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Потребность в горячекатаных профилях для крепи горных выработок составляет сотни тысяч тонн в год. Поэтому обоснование параметров профилей для крепи горных выработок и совершенствование технологии их прокатки являются актуальными задачами.

Известные профили СВП [1] (рис. 1, а) и СПА [2] (рис. 1, б) характеризуются рациональным распределением металла по их сечениям и, соответственно, наиболее высокими статическими показателями. Они отвечают основным требованиям, предъявляемым конструкционному материалу для крепи горных выработок, и превосходят по ним известные отечественные и зарубежные аналоги. Этим обоснован их выбор для выполнения исследований.

Горячекатаный профиль для крепи горных выработок СВП включает полку, имеющую постоянную толщину, симметрично сопряженные с ней наклонные боковые стойки с опорными фланцами на концах, у которых верхняя и нижняя поверхности выполнены плоскими. Спец-

профиль СВП, разработанный и осво-

енный в 50-е годы прошлого столетия, до настоящего времени находит широкое применение на практике.



1 — полка; 2 — стойки; 3 — фланцы

Рисунок 1 — Профили для крепи горных выработок: а — СВП [1]; б — СПА [2]

Горячекатаный профиль для крепи горных выработок СПА включает полку, имеющую переменную толщину, симметрично сопряженные с ней наклонные боковые стойки с опорными фланцами на концах, у которых верхняя и нижняя поверхности выполнены под острым углом к горизонтальной плоскости. СПА разработан в начале 21-го столетия с целью получения повышенных статических показателей за счет перераспределения массы в сечении профиля и реализации возможности принудительного зацепления по фланцам спецпрофилей при их сопряжении.

Профили для крепи горных выработок в основном прокатывают из конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5 (нормальной прочности с пределом текучести до 300 МПа).

Арочные крепи для капитальных и подготовительных выработок шахт должны выдерживать значительные нагрузки горного давления. Поэтому к спецпрофилям для них, которые работают на сжатие и изгиб, предъявляются требования высокой прочности и устойчивости сечения. Для выполнения этих требований актуально использование сталей высокой прочности.

Известно, что изготовление арочной крепи из профилей, прокатанных из конструкционной легированной стали 14Х2ГМР (высокой прочности с пределом текучести до 700 МПа), позволило существенно повысить их несущую способность. Вместе с тем изыскание более дешевых высокопрочных сталей для арочных крепей имеет высокую актуальность [3].

Для решения этой задачи, а также повышения несущей способности крепи горных выработок актуально обосновать для горячекатаных профилей СВП и СПА замену конструкционной углеродистой стали Ст5 на конструкционную низколегированную сталь высокой прочности с пределом текучести не менее 450 МПа. Поэтому требуется выполнение конечно-элементного моделирования процессов нагружения профилей для крепи горных выработок

СВП и СПА из указанных сталей, работающих на сжатие и изгиб, с целью исследования их прочности и устойчивости. Актуальна оценка напряженно-деформированного состояния элементов профилей СВП и СПА от действия эксплуатационных нагрузок. Схемы нагружения должны моделировать различные эксплуатационные ситуации и, соответственно, нагрузки, которые имеют место на практике. Напряженное состояние элементов профилей необходимо сравнивать как по абсолютным значениям напряжений, так и по склонности элементов профилей к концентрации наибольших напряжений в одних и тех же зонах при различных вариантах нагружения.

Также актуально выполнить конечно-элементное моделирование процессов прокатки профилей для крепи горных выработок СВП и СПА по способу [4], позволяющему совместить в фасонных проходах высотную деформацию их элементов с интенсивным растяжением боковых наклонных стенок. Способ может обеспечить высокую технологичность на сортовых прокатных станах. Для совершенствования технологии прокатки на базе этого способа необходимо получение расширенных представлений о механизме процесса высотной деформации элементов профилей с интенсивным растяжением боковых наклонных стенок.

Постановка задачи. В работе поставлена задача выбора для профилей крепи горных выработок СВП и СПА конструкционной низколегированной стали высокой прочности, имеющей предел текучести не менее 450 МПа, и разработки для нее базы цифровой информации о напряжении течения металла при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с^{-1} и температуры в диапазоне 900–1200 °С.

Изложение материала и его результаты. Рационально профили СВП и СПА получать прокаткой из конструкционной низколегированной стали высокой прочности, имеющей предел текучести не ме-

нее 450 МПа, которая будет более дешевой по сравнению с конструкционными легированными сталями типа 14Х2ГМР, 14ХГН, имеющими предел текучести не менее 700 МПа. При этом также целесообразно выбрать сталь, у которой напряжение течения металла при горячей пластической деформации будет соответствовать кривым течения стали 14ХГН, для которой в работе [5] по указанным кривым имеется экспериментальная информация.

В итоге анализа механических характеристик ряда конструкционных низколегированных сталей и оценки их стоимости выбрана сталь 18Г2АФД, которая имеет предел текучести 450 МПа, что более чем на 50 % выше предела текучести конструкционной углеродистой стали Ст5. Сталь 18Г2АФД применяется для изготовления сварных конструкций различного назначения, несущих элементов сварных конструкций, проката высокой прочности и повышенной стойкости против атмосферной коррозии, применяемого в конструкциях со сварными, клепанными и болтовыми соединениями.

Совершенствование технологии прокатки профилей СВП и СПА на полунепрерывном стане 600 возможно на базе результатов конечно-элементного моделирования процессов деформации металла в сложных фасонных калибрах в системе DEFORM 3D. Для реализации моделирования требуется разработка базы цифровой информации о напряжении течения стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с^{-1} и температуры металла в диапазоне 900–1200 °С.

Методика разработки базы цифровой информации о напряжении течения стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации следующая. На первом этапе в окне программы (рис. 2), созданной в работе [6], выполняется проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим рас-

четным значениям, полученным на базе метода [7] с учетом химического состава стали 18Г2АФД.

На следующем этапе с использованием метода и компьютерной программы, созданных в работе [8], а также с учетом экспериментальных данных [5] по напряжению течения стали 14ХГН выполняется уточнение констант, определяющих термокинетические параметры в методе [7] расчета напряжения течения металла с учетом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации (рис. 3, 4).

Затем повторно в окне программы, показанном на рисунке 5, выполняется проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим расчетным значениям для стали 18Г2АФД, полученным на базе метода [7] и уточненных на базе метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры.

На заключительном этапе разрабатывается база цифровой информации о напряжении течения конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации на базе формул метода [7] и уточненных с использованием метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры.

На рисунке 2 в области факторного пространства, определенного экспериментальными кривыми течения для стали 14ХГН [5], выполнена проверка точности аппроксимации экспериментальной информации. Для заданных значений факторов выполнено определение напряжения течения металла путем сплайн-интерполяции экспериментальной информации по методу, изложенному в работе [6]. Соответствующие расчетные значения, получены на базе метода [7] с учетом химического состава стали 18Г2АФД, который был задан в таблице в правом верхнем углу окна программы (рис. 2). Проверка выполнялась в точках, определенных планируемым экспериментом (более подробно методика планируемого

МЕТАЛЛУРГИЯ

эксперимента для рассматриваемого класса задач приведена в [6]). Средняя относительная ошибка аппроксимации экспериментальной информации составила 14,8 %. В отдельных опытах ошибка достигала 29,8 %. В указанном окне программы выполнена также проверка адекватности формул метода [7] с помощью критерия Фишера.

На следующем этапе выполнены исследования, направленные на повышение точности аппроксимации экспериментальных данных. Подробно методика уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формулах метода [7] приведена в работе [8]. Уточненные константы показаны в правой части окна программы, представленного на рисунке 3, ниже опции «Выполнить». Соответствующие экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения сталей показаны на рисунке 4.

После этого выполнена повторная проверка точности аппроксимации экспериментальной информации. Проверка выполнялась аналогично приведенной на рисунке 2. Отличие заключалось в использовании уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формулах метода [7]. Указанные константы были заданы в таблице, расположенной в правой части окна программы, представленного на рисунке 5. При этом средняя относительная ошибка аппроксимации экспериментальной информации составила 6,5 %. В отдельных опытах ошибка достигала 15 %. То есть ошибка уменьшилась практически в два раза. Результаты проверки адекватности формул метода [7] с учетом уточненных констант с помощью критерия Фишера также существенно улучшились.

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ \Конструкционные стали\3. Конструкционные легированные стали\14ГН, [1], стр.119, рис.49

Пределы изменения факторов

| | | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| ε_{\min} | ε_{\max} | U min (1/c) | U max (1/c) | T min. (град.С) | T max. (град.С) |
| 0.051 | 0.693 | 0.5 | 50 | 900 | 1200 |

Химический состав [%]

| | |
|------------------|------|
| C (0.05 - 1.1) | 0.18 |
| Si (0 - 1.65) | 0.17 |
| Mn (0.03 - 1.55) | 1.55 |
| Cr (0 - 0.3) | 0.3 |
| Ni (0 - 0.3) | 0.3 |
| P (0 - 0.05) | 0.03 |
| S (0 - 0.05) | 0.03 |
| V (0 - 0.26) | 0.12 |
| Cu (0 - 0.28) | 0.15 |

Кодовые и натуральные значения факторов

| | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|---------|---------|----------|----------|---------|
| Кодовые значения факторов | ε | -1.2154 | -1 | 0 | +1 | +1.2154 |
| Натуральные значения факторов | U (1/c) | 0.051 | 0.1079 | 0.3720 | 0.6361 | 0.693 |
| | T (град.С) | 0.5 | 4.886 | 25.250 | 45.614 | 50 |
| | | 900 | 926.584 | 1050.000 | 1173.416 | 1200 |

План-матрица эксперимента

| | X1 | X2 | X3 | ε | U (1/c) | T (град.С) | $\sigma_{\text{экс}}$ (МПа) |
|----|---------|---------|---------|---------------|---------|------------|-----------------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0.1079 | 4.886 | 926.584 | 107.501 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | 0.6361 | 4.886 | 926.584 | 155.602 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | 0.1079 | 45.614 | 926.584 | 144.743 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | 0.6361 | 45.614 | 926.584 | 216.474 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | 0.1079 | 4.886 | 1173.416 | 49.220 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | 0.6361 | 4.886 | 1173.416 | 73.420 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | 0.1079 | 45.614 | 1173.416 | 75.449 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 0.6361 | 45.614 | 1173.416 | 107.949 |
| 9 | -1.2154 | 0 | 0 | 0.051 | 25.250 | 1050.000 | 80.741 |
| 10 | +1.2154 | 0 | 0 | 0.693 | 25.250 | 1050.000 | 138.517 |
| 11 | 0 | -1.2154 | 0 | 0.3720 | 0.5 | 1050.000 | 69.118 |
| 12 | 0 | +1.2154 | 0 | 0.3720 | 50 | 1050.000 | 149.590 |
| 13 | 0 | 0 | -1.2154 | 0.3720 | 25.250 | 900 | 183.634 |
| 14 | 0 | 0 | +1.2154 | 0.3720 | 25.250 | 1200 | 79.773 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0.3720 | 25.250 | 1050.000 | 125.814 |

Результаты расчета

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp \left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right)$$

| | |
|--------------------------|--------------|
| σ (МПа) | Δ (%) |
| 136.670 | 27.133 |
| 178.086 | 14.450 |
| 187.889 | 29.808 |
| 238.817 | 10.321 |
| 63.446 | 28.904 |
| 66.975 | 8.779 |
| 81.251 | 7.690 |
| 97.224 | 9.936 |
| 90.004 | 11.472 |
| 136.229 | 1.652 |
| 83.266 | 20.470 |
| 151.511 | 1.284 |
| 234.795 | 27.860 |
| 89.262 | 11.895 |
| $\Delta_{\text{ср}}$ (%) | 14.829 |

Q 370523.373
A 64229148367103.586

Q по формуле В.С. Солода и др.
 Q по формуле S.F. Medina и др.
 Q по объединенной формуле
 Усовершенствованный метод

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Грассч 23.306 Гтабл 3.59 Грассч > Гтабл (адекватность обоснована)

Рисунок 2 — Проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим расчетным значениям, полученным на базе метода [7] с учетом химического состава стали 18Г2АФД

МЕТАЛЛУРГИЯ

Метод, уточняющий параметры формулы Солода В.С. и др.

Количество марок стали: 1

Пределы изменения факторов

| | | | | | | |
|---------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| 18Г2АФД | ε_{\min} | ε_{\max} | U min (1/c) | U max (1/c) | T min, (град.С) | T max, (град.С) |
| | 0.051 | 2.0 | 0.5 | 50 | 900 | 1200 |

Расчет напряжения течения металла

по экспериментальным кривым упрочнения

Количество ε : 300

Количество T: 25

Количество U: 25

Переход к каталогу

Удалить марку стали

Химический состав (%)

| Наименование | 18Г2АФД |
|------------------|---------|
| C (0.05 - 1.1) | 0.18 |
| Si (0 - 1.65) | 0.17 |
| Mn (0.03 - 1.55) | 1.55 |
| Cr (0 - 0.3) | 0.3 |
| Ni (0 - 0.3) | 0.3 |
| P (0 - 0.05) | 0.03 |
| S (0 - 0.05) | 0.03 |
| V (0 - 0.26) | 0.12 |
| Cu (0 - 0.28) | 0.15 |

по формулам Солода В.С. и др.

Выполнить

| | | | |
|----|-------|----|-------|
| n1 | 72.06 | m1 | 0.131 |
| n2 | 51.66 | m2 | 0.149 |
| n3 | 0.193 | m3 | 0.112 |
| n4 | 0.268 | m4 | 0.107 |

18Г2АФД

Q: 370523.372585

| n | $\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа) | Δ (%) |
|--------|-------------------------------|--------------|
| 123643 | 118.543 | 12.088 |
| 123644 | 118.748 | 11.762 |
| 123645 | 118.933 | 11.439 |
| 123646 | 119.096 | 11.119 |
| 123647 | 119.240 | 10.800 |
| 123648 | 119.366 | 10.483 |
| 123649 | 119.473 | 10.167 |
| 123650 | 119.562 | 9.852 |
| 123651 | 119.635 | 9.537 |
| 123652 | 119.692 | 9.222 |
| 123653 | 119.734 | 8.908 |
| 123654 | 119.761 | 8.593 |

по уточненным параметрам формулы Солода В.С. и др.

Начальные параметры

| | | | |
|----|-----------|----|----------|
| n1 | 75.509539 | m1 | 0.108231 |
| n2 | 59.750056 | m2 | 0.120618 |
| n3 | 0.297209 | m3 | 0.083131 |
| n4 | 0.554243 | m4 | 0.063827 |

Выполнить

Новая итерация

| n | $\sigma_{\text{расч.}}$ (МПа) | Δ (%) |
|--------|-------------------------------|--------------|
| 123643 | 102.511 | 3.071 |
| 123644 | 103.019 | 3.041 |
| 123645 | 103.512 | 3.010 |
| 123646 | 103.989 | 2.976 |
| 123647 | 104.452 | 2.942 |
| 123648 | 104.900 | 2.907 |
| 123649 | 105.333 | 2.871 |
| 123650 | 105.753 | 2.836 |
| 123651 | 106.160 | 2.801 |
| 123652 | 106.553 | 2.768 |
| 123653 | 106.933 | 2.735 |

| n | ε | U, (1/c) | T, (град.С) | $\sigma_{\text{эксп.}}$ (МПа) |
|--------|---------------|-----------|-------------|-------------------------------|
| 123643 | 0.324773 | 25.250000 | 1100.000000 | 105.759 |
| 123644 | 0.331291 | 25.250000 | 1100.000000 | 106.251 |
| 123645 | 0.337809 | 25.250000 | 1100.000000 | 106.724 |
| 123646 | 0.344328 | 25.250000 | 1100.000000 | 107.179 |
| 123647 | 0.350846 | 25.250000 | 1100.000000 | 107.618 |
| 123648 | 0.357365 | 25.250000 | 1100.000000 | 108.040 |
| 123649 | 0.363883 | 25.250000 | 1100.000000 | 108.447 |
| 123650 | 0.370401 | 25.250000 | 1100.000000 | 108.840 |
| 123651 | 0.376920 | 25.250000 | 1100.000000 | 109.219 |
| 123652 | 0.383438 | 25.250000 | 1100.000000 | 109.586 |
| 123653 | 0.389957 | 25.250000 | 1100.000000 | 109.940 |
| 123654 | 0.396475 | 25.250000 | 1100.000000 | 110.284 |

Рисунок 3 — Расчет уточненных констант для стали 18Г2АФД

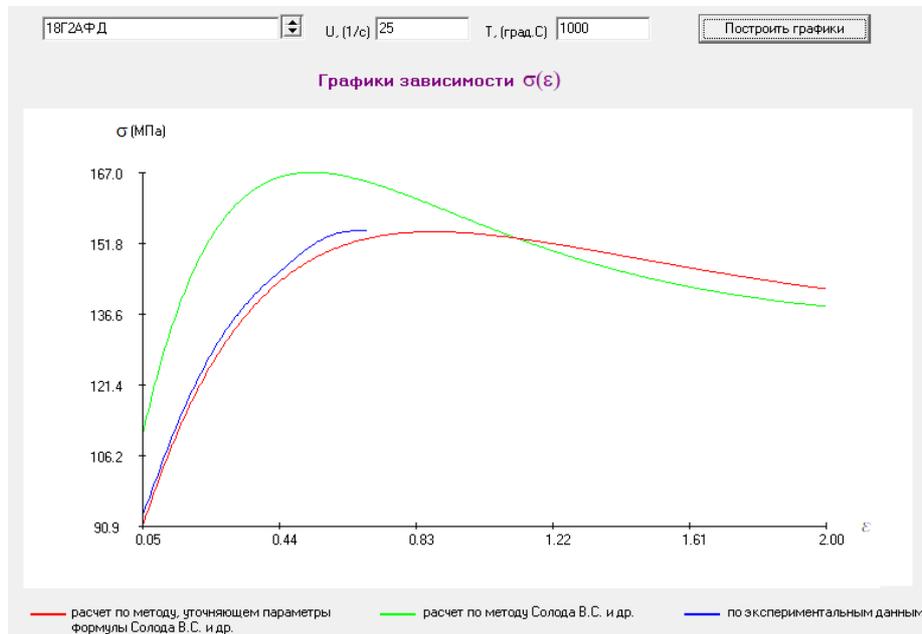


Рисунок 4 — Экспериментальная и расчётные кривые напряжения течения сталей $\sigma=f(\varepsilon)$ при фиксированных значениях U, T :
 экспериментальная кривая для стали 14ХГН (синий);
 расчетная кривая для стали 18Г2АФД, на базе метода [7] (зеленый);
 расчетная кривая для стали 18Г2АФД, на базе метода [7] и уточненных на базе метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры (красный)

МЕТАЛЛУРГИЯ

Метод моделирования напряжения течения углеродистых, низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Имя файла: КАТАЛОГ
 \Конструкционные стали
 \Конструкционные легированные стали\14ГН,
 [1], стр.119, рис.49

Пределы изменения факторов

| | | | | | |
|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
| ε_{\min} | ε_{\max} | U min (1/c) | U max (1/c) | T min, (град.С) | T max, (град.С) |
| 0.051 | 0.693 | 0,5 | 50 | 900 | 1200 |

Химический состав (%)

| | |
|------------------|------|
| C (0.05 - 1.1) | 0.18 |
| Si (0 - 1.65) | 0.17 |
| Mn (0.03 - 1.55) | 1.55 |
| Cr (0 - 0.3) | 0.3 |
| Ni (0 - 0.3) | 0.3 |
| P (0 - 0.05) | 0.03 |
| S (0 - 0.05) | 0.03 |
| V (0 - 0.26) | 0.12 |
| Cu (0 - 0.28) | 0.15 |

Кодовые и натуральные значения факторов

| | | | | | |
|-------------------------------|---------------|---------|------------|----------|---------|
| Кодовые значения факторов | -1.2154 | -1 | 0 | +1 | +1.2154 |
| Натуральные значения факторов | ε | U (1/c) | T (град.С) | | |
| | 0.051 | 0.1079 | 0.3720 | 0.6361 | 0.693 |
| | 0.5 | 4.886 | 25.250 | 45.614 | 50 |
| | 900 | 926.584 | 1050.000 | 1173.416 | 1200 |

План-матрица эксперимента

| | X1 | X2 | X3 | ε | U (1/c) | T (град.С) | $\sigma_{\text{эсп}}$ (МПа) |
|----|---------|---------|---------|---------------|---------|------------|-----------------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 | 0.1079 | 4.886 | 926.584 | 107.501 |
| 2 | +1 | -1 | -1 | 0.6361 | 4.886 | 926.584 | 155.602 |
| 3 | -1 | +1 | -1 | 0.1079 | 45.614 | 926.584 | 144.743 |
| 4 | +1 | +1 | -1 | 0.6361 | 45.614 | 926.584 | 216.474 |
| 5 | -1 | -1 | +1 | 0.1079 | 4.886 | 1173.416 | 49.220 |
| 6 | +1 | -1 | +1 | 0.6361 | 4.886 | 1173.416 | 73.420 |
| 7 | -1 | +1 | +1 | 0.1079 | 45.614 | 1173.416 | 75.449 |
| 8 | +1 | +1 | +1 | 0.6361 | 45.614 | 1173.416 | 107.949 |
| 9 | -1.2154 | 0 | 0 | 0.051 | 25.250 | 1050.000 | 80.741 |
| 10 | +1.2154 | 0 | 0 | 0.693 | 25.250 | 1050.000 | 138.517 |
| 11 | 0 | -1.2154 | 0 | 0.3720 | 0.5 | 1050.000 | 69.118 |
| 12 | 0 | +1.2154 | 0 | 0.3720 | 50 | 1050.000 | 149.590 |
| 13 | 0 | 0 | -1.2154 | 0.3720 | 25.250 | 900 | 183.634 |
| 14 | 0 | 0 | +1.2154 | 0.3720 | 25.250 | 1200 | 79.773 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0.3720 | 25.250 | 1050.000 | 125.814 |

Результаты расчета

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \cdot \exp \left(\frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right)$$

| σ (МПа) | Δ (%) |
|----------------|--------------|
| 110.530 | 2.818 |
| 160.472 | 3.130 |
| 148.859 | 2.844 |
| 204.991 | 5.305 |
| 48.840 | 0.772 |
| 77.669 | 5.787 |
| 64.616 | 14.358 |
| 101.154 | 6.295 |
| 74.418 | 7.832 |
| 131.833 | 4.826 |
| 79.727 | 15.350 |
| 129.570 | 13.384 |
| 192.076 | 4.597 |
| 83.976 | 5.269 |

$\Delta_{\text{ср}}$ (%) 6.453

Выполнить

Рисунок 5 — Повторная проверка точности аппроксимации экспериментальных данных по напряжению течения стали 14ХГН по отношению к соответствующим расчетным значениям для химического состава стали 18Г2АФД, полученным на базе метода [7] и уточненных на базе метода [8] констант, определяющих термокинетические параметры

Полученные результаты позволили по формулам метода [7] и уточненным с использованием метода [8] константам, определяющим термокинетические параметры, разработать базу цифровой информации о напряжении течения конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации (табл. 1).

Таблица 1

База цифровой информации о напряжении течения (МПа) конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации

| Скорость деформации $U, \text{с}^{-1}$ | Степень деформации ε | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,25 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,75 | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2,0 |
| Температура деформации $t = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 78,7 | 89,8 | 99,2 | 113,7 | 119,2 | 132,9 | 137,8 | 138,2 | 137,5 | 134,6 | 131,3 | 128,3 | 125,8 |
| 5 | 111,6 | 122,4 | 131,9 | 147,2 | 153,4 | 170,3 | 178,3 | 179,4 | 181,3 | 179,6 | 176,5 | 173,1 | 169,9 |
| 25 | 141,5 | 152,1 | 161,6 | 177,3 | 183,9 | 202,7 | 213,0 | 214,6 | 218,7 | 218,5 | 216,1 | 212,8 | 209,3 |
| 50 | 156,6 | 167,1 | 176,5 | 192,4 | 199,0 | 218,6 | 229,9 | 231,7 | 236,9 | 237,4 | 235,4 | 232,3 | 228,7 |
| 100 | 173,0 | 183,4 | 192,8 | 208,8 | 215,5 | 235,9 | 248,1 | 250,2 | 256,4 | 257,7 | 256,2 | 253,4 | 249,9 |
| 200 | 191,1 | 201,3 | 210,7 | 226,7 | 233,6 | 254,7 | 267,7 | 270,1 | 277,3 | 279,5 | 278,7 | 276,1 | 272,8 |

МЕТАЛЛУРГИЯ

Продолжение таблицы 1

| Скорость деформации U, c^{-1} | Степень деформации ϵ | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Температура деформации $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 49,2 | 60,5 | 69,6 | 82,5 | 87,0 | 96,1 | 97,4 | 97,2 | 94,5 | 91,4 | 88,8 | 86,9 | 85,7 |
| 5 | 70,8 | 82,0 | 91,3 | 105,5 | 110,8 | 123,5 | 127,5 | 127,7 | 126,4 | 123,3 | 120,1 | 117,3 | 115,2 |
| 25 | 90,7 | 101,7 | 111,2 | 126,1 | 131,9 | 146,8 | 153,0 | 153,7 | 153,9 | 151,4 | 148,0 | 144,8 | 142,0 |
| 50 | 100,8 | 111,7 | 121,1 | 136,3 | 142,3 | 158,2 | 165,3 | 166,2 | 167,2 | 165,1 | 161,9 | 158,5 | 155,5 |
| 100 | 111,8 | 122,6 | 132,1 | 147,5 | 153,6 | 170,5 | 178,6 | 179,7 | 181,6 | 179,9 | 176,8 | 173,4 | 170,1 |
| 200 | 123,9 | 134,7 | 144,1 | 159,7 | 166,0 | 183,8 | 192,8 | 194,1 | 196,9 | 195,9 | 193,0 | 189,6 | 186,2 |
| Температура деформации $t = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 32,4 | 43,7 | 52,3 | 63,5 | 66,9 | 72,2 | 71,3 | 70,8 | 67,8 | 65,3 | 63,7 | 62,8 | 62,3 |
| 5 | 47,3 | 58,6 | 67,6 | 80,4 | 84,8 | 93,5 | 94,6 | 94,3 | 91,6 | 88,5 | 86,0 | 84,2 | 83,1 |
| 25 | 61,1 | 72,3 | 81,6 | 95,4 | 100,3 | 111,5 | 114,4 | 114,4 | 112,4 | 109,2 | 106,2 | 103,8 | 102,0 |
| 50 | 68,2 | 79,3 | 88,6 | 102,8 | 108,0 | 120,2 | 123,9 | 124,1 | 122,6 | 119,5 | 116,3 | 113,6 | 111,6 |
| 100 | 75,9 | 87,0 | 96,4 | 110,8 | 116,3 | 129,6 | 134,2 | 134,5 | 133,6 | 130,6 | 127,3 | 124,4 | 122,1 |
| 200 | 84,5 | 95,5 | 104,9 | 119,6 | 125,3 | 139,6 | 145,1 | 145,7 | 145,4 | 142,7 | 139,3 | 136,2 | 133,6 |
| Температура деформации $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 22,4 | 33,5 | 41,5 | 50,9 | 53,3 | 55,7 | 53,8 | 53,2 | 50,6 | 49,0 | 48,2 | 47,8 | 47,6 |
| 5 | 33,0 | 44,3 | 52,9 | 64,1 | 67,6 | 73,0 | 72,2 | 71,7 | 68,7 | 66,2 | 64,6 | 63,6 | 63,1 |
| 25 | 43,0 | 54,3 | 63,2 | 75,6 | 79,7 | 87,6 | 88,1 | 87,7 | 84,8 | 81,8 | 79,6 | 78,0 | 77,1 |
| 50 | 48,1 | 59,3 | 68,4 | 81,3 | 85,7 | 94,6 | 95,7 | 95,5 | 92,8 | 89,6 | 87,1 | 85,3 | 84,1 |
| 100 | 53,7 | 65,0 | 74,1 | 87,4 | 92,1 | 102,0 | 104,0 | 103,8 | 101,4 | 98,2 | 95,4 | 93,3 | 91,9 |
| 200 | 60,0 | 71,2 | 80,4 | 94,1 | 99,0 | 110,0 | 112,8 | 112,8 | 110,7 | 107,5 | 104,5 | 102,1 | 100,4 |

Выводы:

1. В работе с целью повышения несущей способности крепи горных выработок, изготавливаемой из профилей СВП и СПА, решена задача выбора конструкционной низколегированной стали 18Г2АФД (высокой прочности с пределом текучести 450 МПа) для замены широко используемой на практике конструкционной углеродистой обыкновенного качества стали Ст5 (нормальной прочности с пределом текучести до 300 МПа).

2. Для реализации конечно-элементного моделирования процессов прокатки в си-

стеме DEFORM 3D разработана база цифровой информации о напряжении течения стали 18Г2АФД при горячей пластической деформации с учетом степени деформации до 2,0, скорости деформации до 200 с⁻¹ и температуры металла в диапазоне 900–1200 °С.

Направление дальнейших исследований связано с обоснованием параметров профилей для крепи горных выработок СВП и СПА и совершенствованием технологии их прокатки на полунепрерывном стане 600.

Список источников

1. ГОСТ 18662-2023. Профили горячекатаные специальные взаимозаменяемые (СВП) для крепи горных выработок. Сортамент. М. : Российский институт стандартизации, 2023. 7 с.
 2. Новый профиль для крепления горных выработок / М. Б. Луцкий, В. Я. Кириченко, В. А. Луценко, К. М. Козлов // *Proceedings of the school of underground mining 2002 : International mining forum, Szczyrk. Cracow, 2002. P. 363–368.*
 3. Жербин М. М. Высокопрочные строительные стали (характеристики, область применения, расчет и проектирование). К. : Будівельник, 1974. 160 с.

4. Новый способ прокатки специальных взаимозаменяемых профилей / М. Б. Луцкий [и др.] // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2004. Вып. 18. С. 231–235.

5. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. М. : Металлургия, 1983. 352 с.

6. Яковченко А. В., Снитко С. А., Ивлева Н. И. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации : учебное пособие. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 276 с.

7. Солод В. С., Бейгельзимер Я. Е., Кулагин Р. Ю. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Металл и литье Украины. № 7–8. 2006. С. 52–56.

8. Метод уточнения констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла / А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко, С. И. Кравцова, Н. И. Ивлева // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2022. № 26 (69). 2022. С. 29–39. EDN EPXNZL

© Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Чумак Н. Ю., 2025

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Коробко Т. Б.,
начальником СПЦ ООО «ЮГМК» Клепач Э. Н.*

Статья поступила в редакцию 05.06.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковченко Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор каф. обработки металлов давлением
Донецкий национальный технический университет,
г. Донецк, Россия

Денищенко Павел Николаевич, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Чумак Николай Юрьевич, аспирант каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: nikolay31302@gmail.com

Yakovchenko A. V. (Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia), **Denishchenko P. N.,**
***Chumak N. Yu.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: nikolay31302@gmail.com)

DEVELOPMENT OF A DIGITAL INFORMATION BASE ON FLOW STRESS OF STRUCTURAL LOW-ALLOY STEEL DURING ROLLING OF PROFILES FOR MINE WORKING SUPPORT

It is highly relevant to increase the load-bearing capacity of profiles for mine working support. In practice, they are mainly produced by hot rolling from normal-strength structural carbon steel St5 with a yield strength of up to 300 MPa. The task of selecting high-strength, structural low-alloy steel 18Mn2NWCu with a yield strength of at least 450 MPa for specified profiles, and developing a digital database on metal flow stress during hot plastic deformation, considering deformation up to 2,0, strain rates up to 200 s⁻¹ and temperatures between 900 and 1200 °C, has been solved.

Key words: profiles for mine working support, structural low-alloy steel, metal flow stress, hot plastic deformation, strain degree, strain rate, metal temperature.

References

1. GOST 18662-2023. Hot-rolled special interchangeable profiles (SIP) for the mine working support. Sortiment. Intr. 2023-08-01 M. : Russian standardization institute, 2023. 7 p.

2. Luckiy M. B., Kirichenko V. Ya., Lucenko V. A., Kozlov K. M. *A new profile for mine working support [Novyj profil' dlya krepleniya gornyh vyrabotok]. Proceedings of the school of underground mining 2002. International mining forum, Szczyrk. Cracow, 2002. Pp. 363–368.*

3. Zherbin M. M. *High-strength construction steels (characteristics, application area, calculation and design) [Vysokoprochnye stroitel'nye stali (harakteristiki, oblast' primeneniya, raschet i proektirovanie)]. K. : Budivel'nik, 1974. 160 p.*

4. Luckiy M. B., Dorozhko I. K., Lucenko V. A., Chichkan A. A., Ligus N. N. *New method of rolling special interchangeable profiles [Novyj sposob prokatki special'nyh vzaimozamenyaemyh profilej]. Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. 2004. Iss. 18. Pp. 231–235.*

5. Polukhin P. I., Gun G. Ya., Galkin A. M. *Plastic deformation resistance of metals and alloys : a reference book [Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallov i splavov : spravochnik]. M. : Metalurgija, 1983. 352 p.*

6. Yakovchenko A. V., Snitko S. A., Ivleva N. I. *Methods of computer modeling of metal stress flow in hot plastic deformation processes : a textbook [Metody komp'yuternogo modelirovaniya napryazheniya techeniya metalla v processah goryachej plasticheskoy deformacii : uchebnoe posobie]. Moscow ; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2023. 276 p.*

7. Solod V. S., Bejgel'zimer Ya. E., Kulagin R. Yu. *Mathematical modeling of deformation resistance during hot rolling of carbon steels [Matematicheskoe modelirovanie soprotivleniya deformacii pri goryachej prokatke uglerodistykh stalej]. Metal and Casting of Ukraine. No. 7–8. 2006. Pp. 52–56.*

8. Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravcova S. I., Ivleva N. I. *Method of specifying constants determining thermokinetic parameters in the formula for calculating the metal flow tension [Metod utochneniya konstant, opredelyayushchih termokineticheskie parametry v formule rascheta napryazheniya techeniya metalla]. Collection of Scientific Papers of DonSTI. 2022. No. 26 (69). Pp. 29–39. EDN EPXNZL*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovchenko Aleksandr Vasil'evich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Forming
Donetsk National Technical University,
Donetsk, Russia

Denishchenko Pavel Nikolayevich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Chumak Nikolay Yurievich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: nikolay31302@gmail.com