

УДК 621.778.073

**Бобарикин Ю. Л.
Авсейков С. В.
Мартьянов Ю. В.**

УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ТОНКОЙ СТАЛЬНОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ

В процессе волочения происходит не только формоизменение проволочной заготовки, но и формирование комплекса механических свойств получаемой проволоки. Основной вклад в формирование механических свойств проволоки вносит химический состав металла и режимы холодной деформации проволоки. Механические свойства проволоки влияют на её потребительские качества и технологичность её дальнейшей переработки.

В современном проволочном производстве прогнозирование механических свойств конечной продукции преимущественно ориентировано на эмпирический опыт. Проблема состоит в отсутствии зависимостей, связывающих механические свойства проволоки с режимами её волочения.

Оценка значимости влияния режимов волочения проволоки на её механические свойства после волочения имеет существенное практическое значение. Оно состоит в возможности прогнозировать изменение механических свойств проволоки посредством использования необходимых режимов волочения этой проволоки [1].

Целью работы является изучение формирования механических свойств, управление механическими свойствами тонкой проволоки скоростными режимами процесса волочения.

Представленные исследования выполнены в области производства высокоуглеродистой стальной латунированной проволоки, используемой для дальнейшего изготовления из него металлокорда. Металлокорд широко используется в шинной отрасли как армирующий элемент. Процесс изготовления металлокорда включает в себя основные технологические этапы: волочение тонкой проволоки и свивка металлокорда.

Из-за особенностей процесса волочения имеет место неравномерность напряжений по сечению проволоки, вызванная действием контактных сил трения. Неравномерность напряжений ведёт к неравномерности деформации и, соответственно, к неравномерности упрочнения и неравномерности распределения механических свойств по сечению проволоки. Это явление приводит к снижению качества проволоки, выраженному увеличением обрывности при дальнейшей свивке металлокорда. Уменьшить негативное влияние неравномерности деформации можно дополнительным растяжением проволоки на выходе из последней волоки в потоке волочильного стана [2, 3].

В результате проведенных исследований [4] получены зависимости пластических характеристик тонкой латунированной высокоуглеродистой проволоки от режимов тонкого волочения. Ограничением этого исследования является отсутствие анализа величин предела прочности и предела текучести в зависимости от режимов волочения, а также исследование только одной марки стали 80.

Для расширения области исследования режимов волочения на механические свойства тонкой проволоки был выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований.

В действующих технологиях производства металлокорда были отобраны образцы проволочной заготовки, тонкой проволоки и металлокорда, которые подверглись испытанию на осевое растяжение с целью определения механических свойств (табл. 1).

По результатам механических испытаний на осевое растяжение (табл. 1) построены графики изменения определяемых механических характеристик, представленных на рис. 1, рис. 2.

Результаты механических испытаний

Механические характеристики	3+8x0,35HT			2+2x0,30SHT			2x0,30HT			4+3x0,35UT		
	Заготовка d=1,89 мм Сталь 80	Тонкая проволока	Агрегатный разрыв	Заготовка d=1,98 мм Сталь 80	Тонкая проволока	Агрегатный разрыв	Заготовка d=1,77 мм Сталь 80	Тонкая проволока	Агрегатный разрыв	Заготовка d=2,15 мм Сталь 95	Тонкая проволока	Агрегатный разрыв
Модуль упругости, E, ГПа	185,33	203,93	179,96	176,67	202,16	183,34	176,09	205,7	198,47	180,65	197,03	182
Условный предел текучести, σ_y , МПа	879,47	2853,64	2663,29	889,16	3132,81	3012,5	886,02	3077,14	2894,29	994	3095	2126
Предел прочности, σ_B , МПа	1274,54	3056,33	2825,32	1284,30	3376,13	3181,24	1271,80	3235,57	3073,46	1420	3600	2352
Максимальное удлинение при растяжении, A_t , %	7,90	2,42	2,39	8,30	2,64	2,37	7,95	2,27	2,39	-	2,66	-

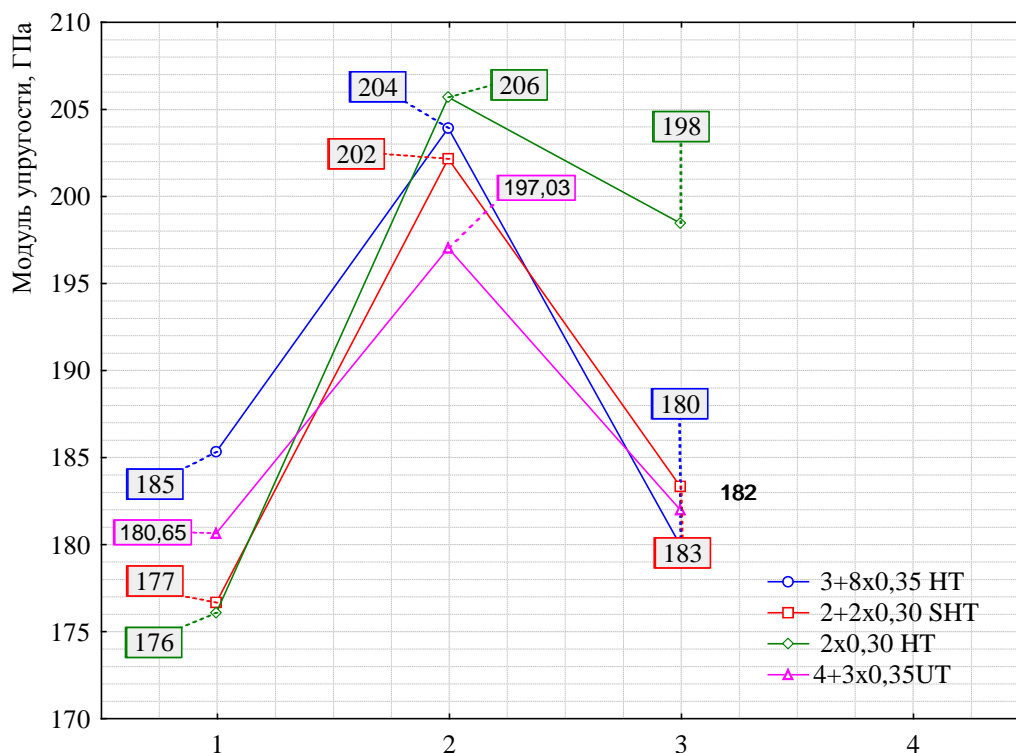


Рис. 1. Определение модуля упругости в:

1 – проволочной заготовке; 2 – тонкой проволоке после волочения; 3 – целом металлокорде

Из рис. 1 видно, что значение модуля упругости у тонкой проволоки по сравнению с заготовкой повышается. То есть, тонкое волочение значительно влияет на изменение модуля упругости. Величина модуля упругости свитого металлокорда ниже, чем величина модуля упругости для отдельных проволок.

На рис. 2 представлены графики изменения условного предела текучести σ_y и предела прочности σ_b . Отношение предела текучести к прочности σ_y/σ_b в проволочной заготовке составляет в среднем 0,69.

В связи с большой деформацией проволочной заготовки в процессе тонкого волочения значения предела текучести и прочности возрастают в тонкой проволоке в среднем на 2000 МПа по сравнению с проволочной заготовкой.

Из анализа рис. 1 и рис. 2 можно предположить, что изменение деформационных режимов волочения может существенно повлиять на характер упрочнения и механические свойства проволоки. На свойства проволоки влияют основные деформационные режимы: суммарная деформация, скорость волочения, температура проволоки при волочении. Суммарная деформация определяет степень деформационного упрочнения металла. Скорость волочения влияет на температуру проволоки при волочении. Температура проволоки при волочении зависит не только от скорости волочения, но и от контактных условий между проволокой и волокой. Повышенная температура высокоуглеродистой проволоки при волочении вызывает дополнительное упрочнение за счет деформационного старения и выделения мартенсита на поверхности проволоки. Характер упрочнения влияет на соотношение прочностных и пластических свойств проволоки.

Наибольший интерес вызывает исследование металлокорда 4+3x0,35УТ, отличающегося ультрапрочным классом прочности, применяемого в шинах грузового автотранспорта. Повышенная прочность металлокорда обеспечивает повышенную эффективность эксплуатации шин. Основным технологическим фактором, ограничивающим выпуск данного металлокорда, является низкая производительность тонкого волочения или низкая скорость волочения. Поэтому дальнейшие исследования связаны с влиянием скорости волочения на основные механические свойства тонкой проволоки.

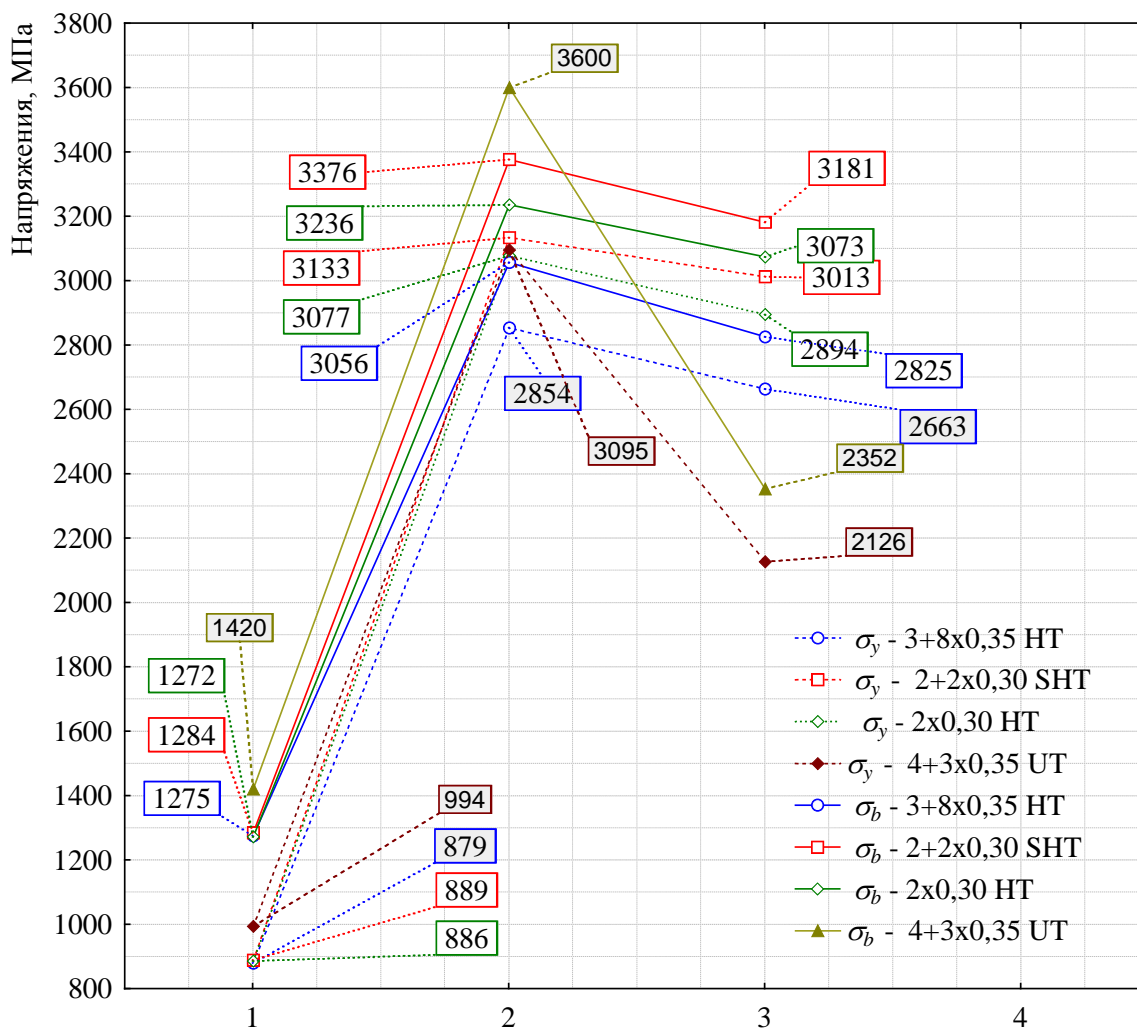


Рис. 2. Изменение условного предела текучести и предела прочности в:
1 – проволочной заготовке, 2 – тонкой проволоке после волочения, 3 – целом металлокорде

Экспериментальные исследования состояли в волочении на разных скоростях проволоки 0,35UT с использованием следующих значений суммарных деформаций: для заготовки

$d = 2,15$ мм суммарная деформация составляет $\ln\left(\frac{2,15^2}{0,35^2}\right) = 3,63$; для заготовки $d = 1,9$ мм

суммарная деформация составляет 3,38; для заготовки $d = 1,7$ мм суммарная деформация составляет 3,16.

Зависимость механических свойств тонкой проволоки 0,35UT (заготовка $d = 2,15$ мм) в действующей технологии волочения от скорости волочения на основании опытных данных представлена на рис. 3.

С увеличением скорости волочения наблюдается рост предела прочности проволоки и увеличение относительного удлинения, что свидетельствует об увеличении прочности и пластичности одновременно. Предел текучести с увеличением скорости волочения снижается.

Аналогичные испытания были проведены для тонкой проволоки 0,35UT (заготовка $d = 1,9$ мм) и для тонкой проволоки 0,35UT (заготовка $d = 1,7$ мм). Полученные результаты изображены на рис. 4 и рис. 5.

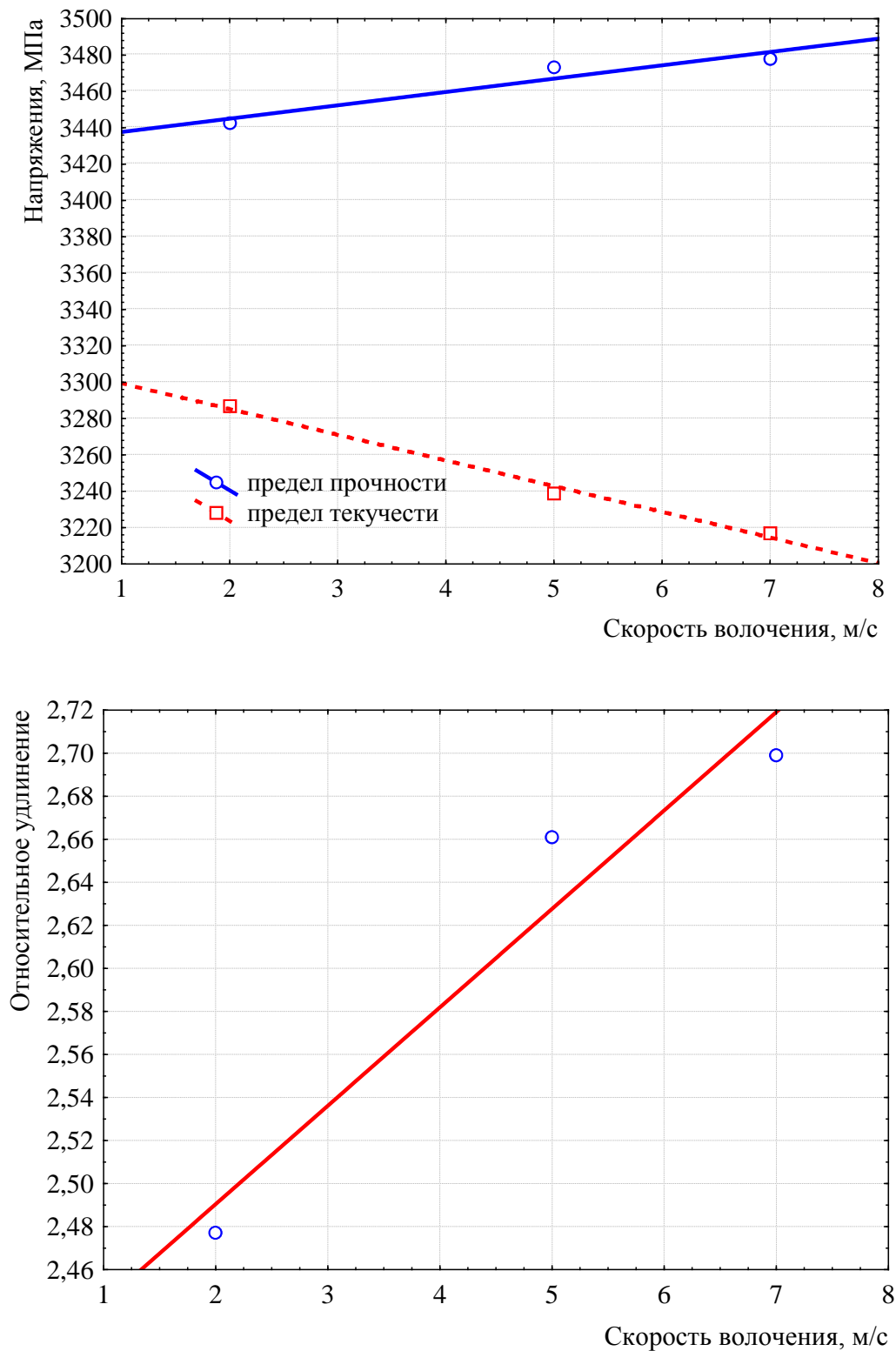


Рис. 3. Зависимость механических свойств проволоки от скорости волочения для проволоки 0,35UT с проволочной заготовкой $d = 2,15$ мм

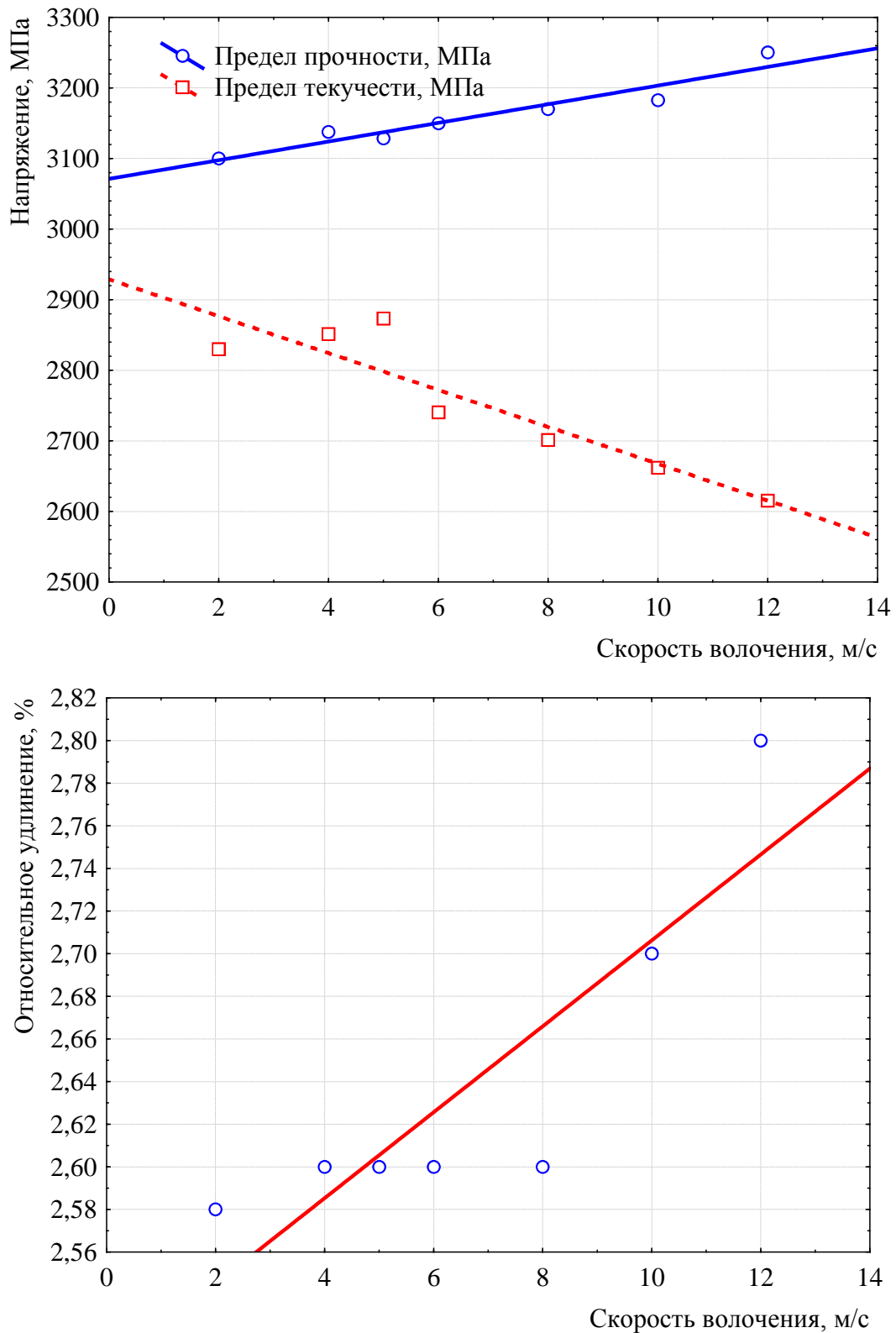


Рис. 4. Зависимость механических свойств проволоки от скорости волочения для проволоки 0,35UT с проволочной заготовкой $d = 1,9$ мм.

Для проволоки 0,35UT с проволочной заготовкой $d = 1,9$ мм наблюдается незначительный рост предела прочности и предела текучести с увеличением скорости волочения и снижение относительного удлинения. Это ведёт к потере пластичности и увеличению хрупкости металла.

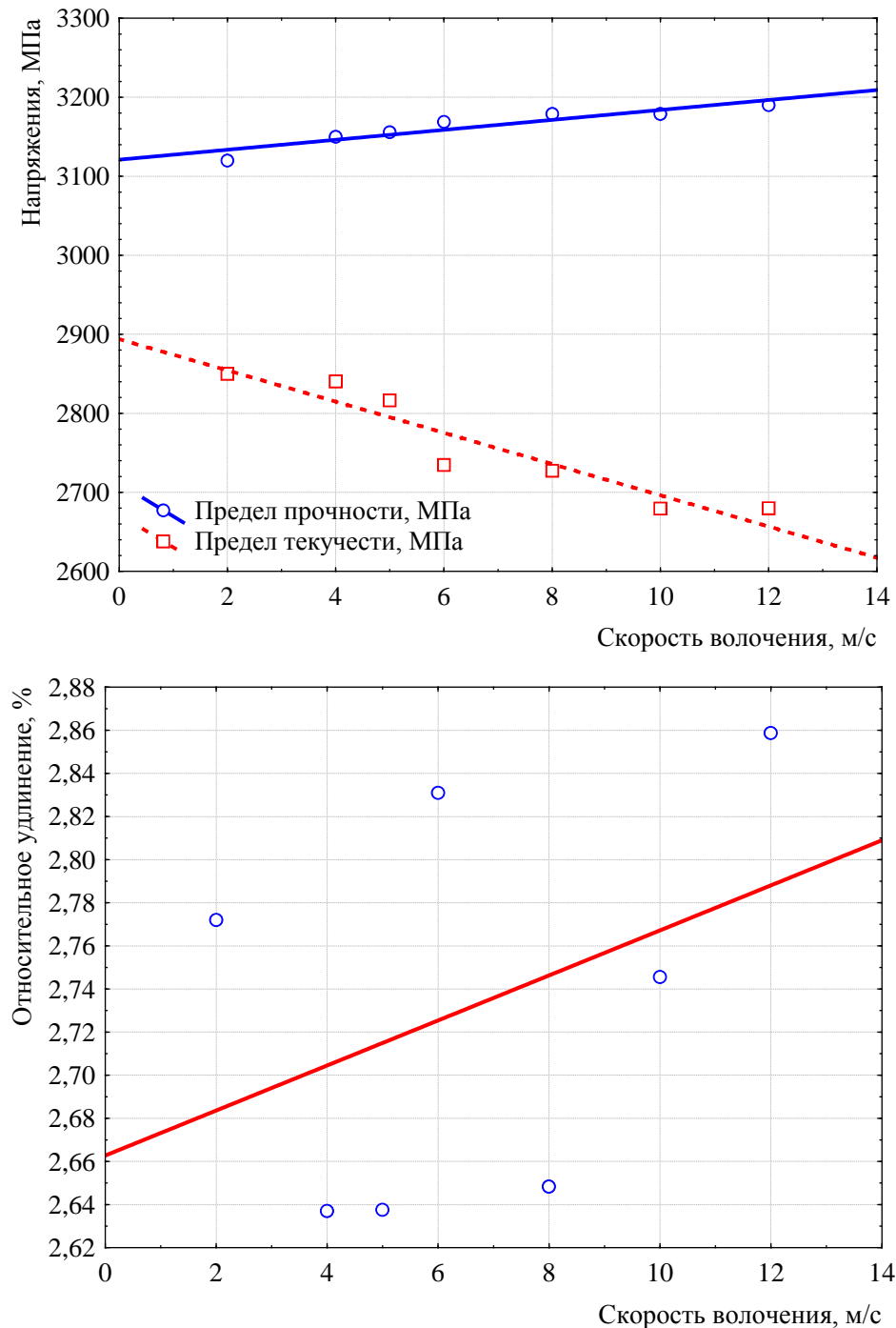


Рис. 5. Зависимость механических свойств проволоки от скорости волочения для проволоки 0,35UT с проволочной заготовкой $d = 1,7$ мм

Для проволоки 0,35UT с проволочной заготовкой $d = 1,7$ мм наблюдается незначительный рост предела прочности и предела текучести с увеличением скорости волочения. Относительное удлинение возрастает с увеличением скорости волочения. Разница в результатах для разных проволочных заготовок возникает из-за разных технологических режимов волочения.

Можно сделать заключение, что в определённом диапазоне механические свойства проволоки можно регулировать с помощью изменения скорости волочения.

Для управления механическими свойствами предлагается использовать энергетический критерий W , измеряемый в условных единицах. W характеризует количество энергии, накопленной в проволоке в процессе пластической деформации волочением.

Диаграммы, полученные при растяжении образцов проволоочной заготовки и тонкой проволоки можно перевести из системы координат $\sigma(\delta)$ в систему координат $F(\Delta l)$. В данном случае σ – напряжения, МПа; %; Δl – удлинение образца. Площадь под кривой диаграммы растяжения в системе координат $F(\Delta l)$ есть численное выражение энергии W .

Переход от системы координат $\sigma(\delta)$ к $F(\Delta l)$ отражён в выражении (1).

$$W = F(l_k - l_0) = \sigma \cdot \frac{(l_k - l_0)}{l_0} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot l_0\right) = \sigma \cdot \delta \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot l_0\right) \quad (1)$$

$$\Delta W = \frac{W^m - W^3}{W^3} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где l_k – конечная длина образца, мм; l_0 – начальная длина образца, мм; d – диаметр образца, мм; F – усилие разрыва при испытаниях на растяжение, Н; δ – относительное удлинение образца; W^m – энергия тонкой проволоки после волочения; W^3 – энергия проволоочной заготовки; ΔW – относительное изменение энергетического критерия.

Каждому комплексу механических свойств проволоочной заготовки соответствует своё значение W^3 . Каждому комплексу механических свойств тонкой проволоки соответствует собственное значение W^m . Предполагается, что для сохранения качества продукции должно соблюдаться условие $\Delta W = \text{const}$. Условие постоянства ΔW обеспечивает неизменное количество энергии, затраченное на упрочнение проволоки. Поэтому, если вводить изменения в режимы волочения с соблюдением условия $\Delta W = \text{const}$, то механические свойства тонкой проволоки не изменятся. Если ставить задачу повышения скорости волочения при условии сохранения механических свойств проволоки, то необходимо поддерживать неизменным значение ΔW . Исходя из этого условия, предлагается использовать цветковые диаграммы, представленные на рис. 6, рис. 7.

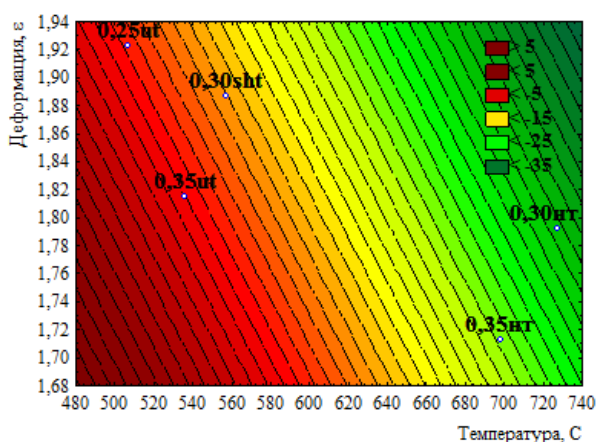


Рис. 6. Цветовая диаграмма деформации и температуры проволоки на этапе тонкого волочения

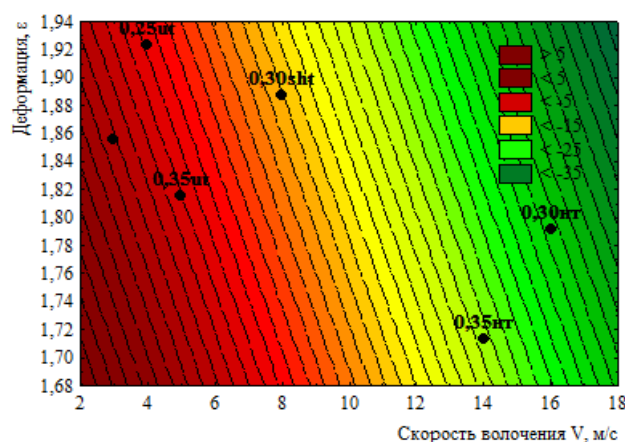


Рис. 7. Цветовая диаграмма деформации и скорости проволоки на этапе тонкого волочения

На диаграммах (рис. 6, 7) точками показаны различные виды тонкой проволоки. Цветом и косыми линиями на диаграмме отмечены области одинакового изменения энергетического критерия ΔW . Для сохранения механических свойств необходимо, чтобы каждый вид проволоки находился в своей цветовой области при изменении режимов волочения. Например, для увеличения скорости можно уменьшить суммарную деформацию.

ВЫВОДЫ

В результате проведённых исследований выполнен анализ изменения величины основных механических параметров тонкой проволоки в зависимости от режимов волочения. Разработан новый принцип управления механическими свойствами тонкой проволоки, осно-

ванный на энергетическом критерии, позволяющий сохранять механические свойства проволоки при изменении режимов волочения.

Управлять формированием комплекса механических свойств тонкой проволоки на этапе волочения возможно с помощью энергетического критерия. Для получения заданных механических свойств тонкой проволоки необходимо поддерживать изменение значения энергетического критерия постоянным.

Определены пути повышения скорости волочения при сохранении механических свойств проволоки в регламентируемых пределах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобарикин Ю. Л. *Формирование механических характеристик тонкой углеродистой латунированной проволоки в процессе тонкого волочения* / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков // *Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики И88 и управления : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Гомель, 24–25 апр. 2014. М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого.* – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – 509 с.

2. Пат. №1991-30982 Японии. *Способ производства стального корда и устройство для его производства* / Окамото Кэнъити, Кисимото Акира, Нисимура Ёсифуми. Патентное бюро Японии. – Публ. : 25.09.1992. – 6 с.

3. Бобарикин Ю. Л. *Способ повышения прямолинейности металлокорда осевым растяжением тонкой проволоки* / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, Ю. В. Мартьянов // *Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. тр.* – Под ред. Корчунова А. Г. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск, 2014. – Вып. 3. – 218 с.

REFERENCES

1. Bobarikin Ju. L. *Formirovanie mehanicheskikh harakteristik tonkoj uglerodistoj latunirovannoj provoloki v processe tonkogo volochenija* / Ju. L. Bobarikin, S. V. Avsejkov // *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, jenergetiki I88 i upravlenija : materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. Gmel', 24–25 apr. 2014. M-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Gmel. gos. tehn. un-t im. P. O. Suhogo.* – Gmel' : GGTU im. P. O. Suhogo, 2014. – 509 s.

2. Pat. №1991-30982 Japoniya. *Sposob proizvodstva stal'nogo korda i ustrojstvo dlja ego proizvodstva* / Okamoto Kjeniti, Kisimoto Akira, Nisimura Josifumi. Patentnoe bjuro Japonii. – Publ. : 25.09.1992. – 6 s.

3. Bobarikin Ju. L. *Sposob povysheniya prjamolinejnosti metallokorda osevym rastjazheniem tonkoj provoloki* / Ju. L. Bobarikin, S. V. Avsejkov, Ju. V. Mart'janov // *Mehanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov: mezhdunar. sb. nauch. tr.* – Pod red. Korchunova A. G. – Magnitogorsk : Izd-vo Magnitogorsk, 2014. – Vyp. 3. – 218 s.

Бобарикин Ю. Л. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. «МиЛП» ГГТУ;
Авсейков С. В. – ассистент каф. «МиЛП» ГГТУ;
Мартьянов Ю. В. – мл. науч. сотр. ГГТУ.

ГГТУ – Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, г. Гомель (Республика Беларусь).

E-mail: bobarikin@tut.by, avseikov@tut.by, you_rock@tut.by

Статья поступила в редакцию 16.09.2015 г.