

**Тришевский О.И.**

Харьковский национальный  
технический университет сельского  
хозяйства имени П.Василенко,  
г. Харьков, Украина  
E-mail: 3shev@ukr.net

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТА

УДК 621.771.63

В работе описываются особенности новой технологии деформационного упрочнения плоских участков гнутых профилей проката путём формовки на заготовке за счёт местной вытяжки мелких продольных рифлений. Приведены результаты исследований величины и характера изменения механических свойств по сечению неупрочненных и упрочненных (рифленых) профилей. Исследовано влияние высоты формируемых рифлений на степень деформационного упрочнения сортовых гнутых профилей.

Новая технология позволяет увеличить несущую способность гнутых профилей и получить экономию металла в результате уменьшения их толщины.

**Ключевые слова:** гнутые профили, деформационное упрочнение, продольные рифления, местная вытяжка, механические свойства, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, снижение металлоёмкости

### **Вступление, актуальность и постановка проблемы.**

Улучшение качества продукции и снижение металлоемкости выпускаемых машин и механизмов путем повышения прочностных характеристик применяющихся в них конструкционных элементов является одной из актуальнейших задач современного машиностроения.

В настоящее время в различных отраслях промышленности, в том числе и в сельскохозяйственном машиностроении, широко применяются гнутые профили, изготавливаемые методом холодной гибки полосы в валках. В поперечном сечении такие профили, как правило, представляют собой чередование гладких участков, имеющих свойства исходной полосы, соединённых между собой радиусными участками изгиба. Как показали проведенные ранее исследования [1], при производстве гнутых профилей проката в результате пластического деформирования в местах изгиба заготовки происходит значительное повышение механических свойств металла, что приводит к увеличению несущей способности профилей в целом. В работе [2] установлено, что для гнутых швеллеров увеличение несущей способности за счет деформационного упрочнения металла при профилировании составляет 5 – 17 %. Однако вследствие локального характера упрочнения механические свойства большей части поперечного сечения гнутого профиля близки к свойствам исходной заготовки.

Значительным резервом повышения несущей способности и жесткости гнутых профилей является увеличение их прочностных характеристик ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ), которое можно достичь тремя способами: дополнительным легированием стали при выплавке, термической обработкой металлопродукции или ее деформационным упрочнением в холодном состоянии (наклепом). Реализация первого способа ограничивается дефицитом дорогостоящих легирующих элементов, второй способ требует громоздких нагревательных и душирующих устройств. Третий способ – способ деформационного упрочнения не требует дополнительных капитальных вложений на изготовление и установку специального оборудования и может быть реализован в клетях обычных профилегибочных станков при нанесении продольных рифлений небольшой высоты на

гладкие участки гнутых профилей [3]. Увеличение прочностных характеристик гнутых профилей за счет дополнительной пластической деформации гладких участков способствует улучшению качества самих профилей, изделий с их применением, а также позволяет снизить расход металла за счет уменьшения толщины используемой заготовки без ухудшения прочностных характеристик готовой продукции.

Таким образом, для создания новых, более эффективных видов изделий и механизмов, в том числе современных машин сельскохозяйственной техники, а также при разработке технологических процессов изготовления гнутых профилей, применяющихся в их конструкциях, необходимо: правильно учитывать указанные технологические и конструктивные особенности и возможности этого эффективного вида металлопродукции, выбирать наиболее рациональные формы и размеры рифлений, позволяющие в наибольшей степени повысить прочностные характеристики готовой продукции, определять возможности получения по энергосиловым параметрам формовки необходимого количества рифлений в одной клети стана, исследовать влияние деформационного упрочнения на изменение механических свойств готовых профилей, что невозможно без проведения соответствующих экспериментальных исследований.

### Основные результаты исследований

Для разработки, исследования, освоения технологии, а также определения эксплуатационных характеристик профилей в металлоконструкциях приняты упрочненные швеллер 120x60x2,5 мм (рис.1,а), z - образный профиль 120x60x2,5 мм, а также корытный профиль 80x60x32x2,5 мм из низколегированной стали 09Г2 (рис.1,б). Последний профиль применяется в тракторных прицепах – в конструкции платформы прицепа взамен аналогичного профиля толщиной 3 мм.

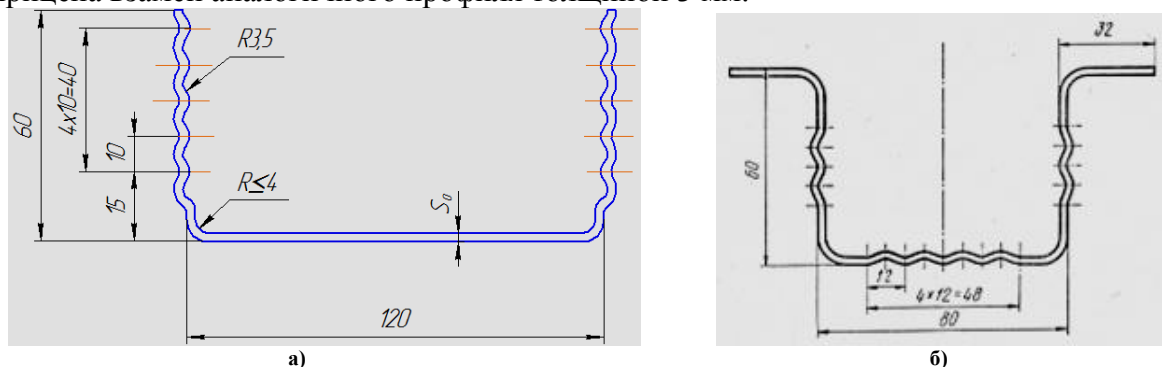


Рис.1 Экспериментальные гнутые профили с плоскими участками, усиленными деформационным упрочнением: а) корытный профиль 80x60x32x2,5 мм; б) швеллер 120x60x2,5 мм

Отработку и исследование технологии формовки рифлений на заготовке, ее профилирование и изготовление партии профилей производили на профилегибочном агрегате 1-4x50-300.

Поскольку сквозные рифления формируют за счет местной вытяжки металла, то ширину заготовки для профилирования определяют в соответствии с конфигурацией профилей по известным зависимостям, принятым для расчета ширины заготовки стандартных сортов профилей. Для швеллера и z - образного профиля ширина заготовки составила 231 мм. Число рифлений, одновременно формируемых за один проход, определяли теоретическими расчетами и подтверждали экспериментальными исследованиями энергетических параметров процесса формообразования рифлений, в соответствии с которыми, исходя из допустимой величины усилия клети стана, число рифлений на полках принимали равным десяти (по пять на каждой полке).



моменти на шпинделях рабочей клетки определялись с помощью наклеиваемых проволочных тензодатчиков. Все измерения проводили с помощью тензометрической станции «Топаз-1» и шлейфового осциллографа Н-700. Погрешность измерений регистрирующей аппаратуры в сумме с погрешностью, вызванной ползучестью датчиков, не превышала 7,5 %. Суммарные усилия в валках составили 120,8 кН, крутящие моменты на шпинделях привода верхнего и нижнего валков – соответственно 1,97 и 1,43 кНм. Допустимые усилия в валках для профилегибочных агрегатов типа 1-4х50-300 в соответствии с технической характеристикой составляют 147 кН, крутящие моменты – 2,35 кНм.

### Исследование деформационного упрочнения корытного профиля 80х60х32х2,5 мм

Для сравнительной оценки прироста механических свойств в результате деформационного упрочнения заготовки исследовали упрочненные и неупрочненные корытные профили 80х60х32х2,5 мм. Для этого на универсальной машине ЦДМ-200 испытывали на разрыв полнопрофильные образцы корытных профилей, изготовленные по обычной технологии и из упрочнённой рифлениями заготовки. Получены следующие результаты:

	$\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\sigma_s$ , Н/мм <sup>2</sup>	$\delta_5$ , %
Исходная заготовка	354	525	32,3
Профиль:			
неупрочненный	413	544	23,5
упрочненный	505	583	20,1
Изменение свойств упрочненного профиля (%) относительно:			
заготовки.	+42,6	+11,0	-37,8
неупрочненного профиля	+22,3	+7,2	-14,5

Как видно из результатов испытаний, предел текучести, по которому, как правило, проводятся прочностные расчеты металлоконструкций, возрос после деформационного упрочнения профиля на 22,3 %, предел прочности — на 7,2 %. Относительное удлинение, хотя и уменьшилось на 14,5%, но осталось достаточно высоким и составило 20,1 %.

Для исследования характера изменения механических свойств по сечению неупрочненных и упрочненных (рифленых) профилей на универсальной испытательной машине ЦД-10 проводились испытания образцов, отобранных от характерных элементов сечения профилей. Результаты проведенных испытаний (рис. 3) показали, что деформационное упрочнение стенок профиля кроме увеличения прочностных характеристик на участках формовки рифлений приводит к их выравниванию по сечению профиля, что благоприятно сказывается на несущей способности профиля в целом.

Учитывая условия работы исследуемого профиля в конструкции платформы тракторного прицепа, для оценки несущей способности металлоконструкций с использованием упрочненных профилей проводили испытание на чистый (четырёхточечный) изгиб образцов профилей совместно с приваренными к полкам листами из стали 09Г2 толщиной 2,5 мм. Изгибающая нагрузка прикладывалась со стороны приваренных листов, что моделировало условия эксплуатации профиля.

При испытаниях профиля на универсальной испытательной машине УИМ-50 фиксировалась нагрузка, соответствующая прогибу образца в средней части. Результаты испытаний (рис. 4) свидетельствуют о большей сопротивляемости из-

гибающим нагрузкам профилей, упрочненных рифлениями, по сравнению с неупрочненными. В области упругих деформаций вплоть до упруго-пластического перехода (прогиб до 3 мм) рифленый профиль более чем на 21 % прочнее, чем аналогичный неупрочненный (рис. 5).

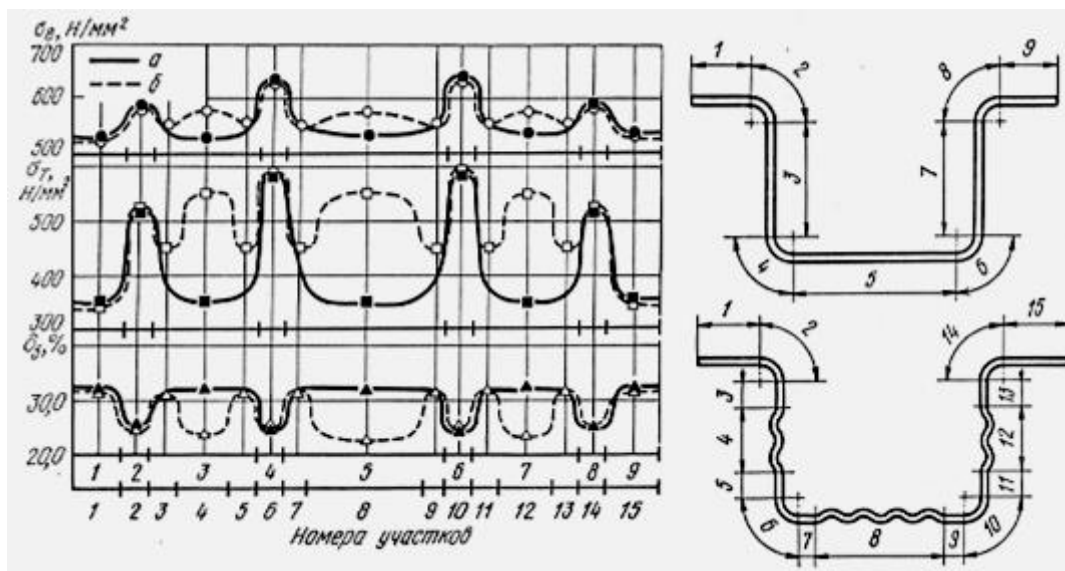


Рис.3. Изменение механических свойств корытного профиля 80x60x32x2,5 мм при упрочнении:  
 а) – неупрочнённый профиль; б) – упрочнённый профиль

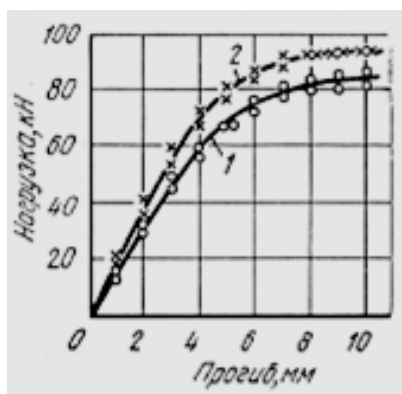


Рис.4. Зависимость величины прогиба от нагрузки при изгибе неупрочнённых (1) и упрочнённых (2) корытных профилей 80x60x32x2,5 мм

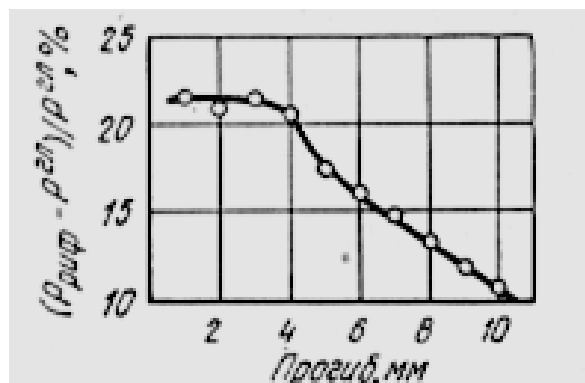


Рис.5. Изменение прироста жёсткости упрочнённого профиля с увеличением стрелы прогиба ( $R_{риф}$ ,  $R_{л}$  – нагрузка на упрочнённый и неупрочнённый профили)

Проведенные исследования и расчеты показали, что усиленный нанесением упрочняющих рифлений корытный профиль и конструкция платформы прицепа, в которой он применяется, по прочности не уступают платформам, изготовленным с применением неупрочнённого корытного профиля 80x60x32x3 мм.

### Исследование влияния высоты формуемых рифлений на деформационное упрочнение швеллера 120x60x2,5 мм

Исследовано влияние наклепа при нанесении рифлений на изменение механических свойств стальных рифленых полос.

Исследовали полосы толщиной 2 мм из стали СтЗГпс; 2,7 мм из стали 08кп и 3,9 мм из стали СтЗ кп и изготовленные из них рифленые полосы с различной высотой рифлений, а также швеллер 120x60x2,5 мм с рифлеными полками из стали 08кп. Шаг

между рифлениями составлял 10 мм, радиус закругления 3,5 мм (Рис. 1.а).

Из результатов испытаний на растяжение рифленых полос (рис. 6) видно, что характер изменения прочностных и пластических свойств полос одинаков для всех исследованных сталей и толщин полос.

Предел текучести и временное сопротивление с увеличением высоты рифлений монотонно возрастают, и при высоте рифлений 1,4 – 1,6 мм, что соответствует степени вытяжки 3 – 3,8%, возрастание  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  прекращается. Максимальное повышение предела текучести для исследованных сталей и толщин полос колеблется в пределах 60 – 80%, временного сопротивления 20 – 40%. Увеличение степени вытяжки (высоты рифления) сопровождается значительным падением пластичности. Из рис. 6 видно, что относительное удлинение ( $\delta_5$ ) уменьшается от 33 – 35% для исходной заготовки до 8,5 – 9,5%, т. е. в 3,5–4 раза. При этом важно отметить, что значительный вклад (60 – 65%) в снижение пластичности вносит ее равномерная составляющая. Равномерное удлинение ( $\delta_p$ ) снижается с 15 – 19% до 2 – 4%. Таким образом, при поперечной вытяжке 3 – 3,8% (высота рифления 1,4 – 1,6 мм) равномерная продольная деформация оказывается практически исчерпанной.

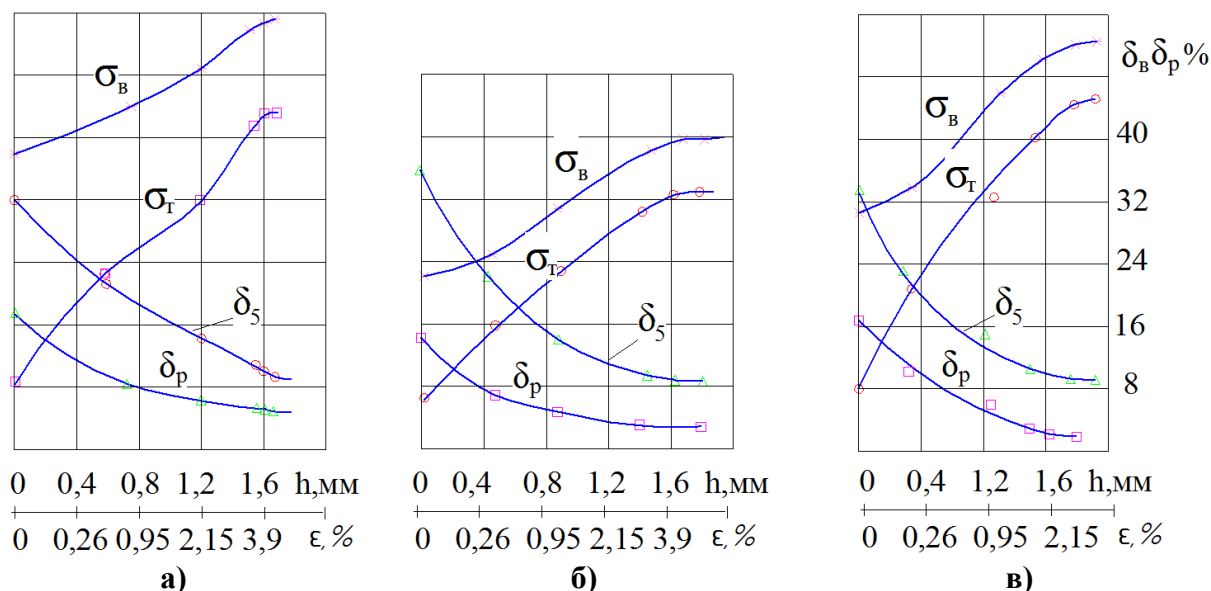


Рис.6. Зависимость прочности и пластичности от высоты рифлений полос:  
 а – из стали Ст3Гпс толщиной 2 мм; б – из стали 08 кп толщиной 2,7 мм; в – из стали Ст3кп толщиной 3,9 мм

Такое резкое падение пластичности вызывает необходимость проверки возможности появления надрывов или трещин при изгибе полос с рифлениями (Таблица 1). Для этого провели испытания на трехточечный изгиб по ГОСТ 14019—80 при толщине оправки, равной двум толщинам исходной полосы. В результате испытаний оказалось, что все образцы, независимо от толщины полосы и марки стали, выдержали испытания на изгиб не только на угол 180°, но и до соприкосновения сторон. При этом на растянутой стороне не наблюдали трещин и надрывов.

Гнутые профили из упрочненной рифлениями заготовки предполагается использовать в различных строительных металлоконструкциях, где они большей частью работают на изгиб, в связи с чем важно количественно оценить сопротивляемость рифленых полос и профилей из них изгибу.

Испытания на изгиб проводили по трехточечной схеме при постоянном расстоянии между опорами 75 мм для полос и 500 мм для профилей.

Прочность и пластичность швеллеров с гладкими и рифлеными полками при изгибе

Характеристика полок	$R_{max}^{изг}$ , кН	$R_{пл}^{изг}$ , кН	$R_{пл}^{изг} / R_{max}$	Величина прогиба до начала $R_{max}$ , мм	Величина прогиба на участке $R_{max}$ , мм	$t g \alpha_{усл}$
Гладкие	22	14,5	0,66	9,7	9,1	0,119
	21,8 – 22,3	14,4 – 14,7		8,8 – 10,6	9,0 – 9,2	0,117 – 0,12
Рифленые	28,1	18,3	0,66	6,1	2,15	0,088
	28,0 – 28,2	18,2 – 18,5		5,8 – 6,4	2,0 – 2,3	0,080 – 0,097

Из приведенных в таблице данных следует, что наличие рифлений на полках повышает на 26 – 27% как сопротивление начальным пластическим деформациям ( $R_{пл}^{изг}$ ), так и максимальное сопротивление при изгибе ( $R_{max}^{изг}$ ). При этом возрастает и крутизна упругого участка деформации, в результате чего при одинаковых нагрузках величина упругого прогиба швеллера с рифлеными полками оказывается на 25% меньше.

Гнутые профили, изготовленные из предварительно упрочненной рифлениями заготовки, с успехом применяются в качестве прогонов для легких кровель, элементов лестниц и в других металлоконструкциях в промышленном строительстве. Их применение повышает несущую способность на 20%, что позволяет экономить до 15% металла.

На основе исследований установлено, что процесс формовки рифлений не влияет на собственно процесс профилирования, поэтому режимы профилирования следует выбирать, руководствуясь известными рекомендациями при расчете калибровок валков. Установлено также, что форма рифлений, шаг между ними и радиус закругления существенно не влияют на изменение величины момента сопротивления. Поскольку на него в основном влияет высота рифлений, то при выборе их размеров следует руководствоваться этим параметром, а остальные выбирать конструктивно. Зная высоту и другие заданные размеры рифлений, можно определить усилие, необходимое для формовки нужного числа рифлений по следующей зависимости:

$$P = \frac{\sigma_m \times S \times l \times n}{l_1} h + \frac{3}{4} \frac{\sigma_m \times S^2 \times n \sqrt{2R_g}}{l} \times \sqrt{h}, \quad (1)$$

где  $\sigma_m$  — предел текучести, Н/мм<sup>2</sup>;

$S$  — толщина формуемой заготовки, мм;

$l_1$  — длина очага деформации в продольном направлении, мм;

$l$  — длина очага деформации в поперечном направлении, мм;

$h$  — высота рифлений, мм;

$n$  — число одновременно формируемых рифлений;

$R_g$  — максимальный радиус формирующего валка, мм.

После сравнения полученного значения усилия с допустимым для клетки стана данного типа принимается решение о количестве клетей, необходимых для формовки нужного числа рифлений. Оптимальная высота рифлений, обеспечивающая максимальное упрочнение, составляет 1,4...1,6 мм. Минимальная высота должна быть не менее 0,6...0,9 мм, так как ей соответствует минимальное значение момента сопротивления сечения при изгибе и допустимая нагрузка остается практически такой же, как и для гладких полос.

## Выводы

1. Разработана и исследована технология повышения прочностных свойств сортовых гнутых профилей проката в результате деформационного упрочнения их плоских участков путём формовки на них за счёт местной вытяжки металла на соответствующих местах плоской заготовки невысоких продольных рифлений.

2. Установлено, что деформационное упрочнение гнутых профилей из малоуглеродистых и низколегированных заготовок толщиной до 2,5 мм может выполняться в первых клетях профилегибочных агрегатов типа 1-4x50-300.

3. Дополнительное деформационное упрочнение заготовки путем формовки рифлений на определенных участках увеличивает прочностные свойства металла на этих участках, причём, предел текучести и временное сопротивление с повышением высоты рифлений монотонно возрастают и при высоте рифлений 1,4... 1,6 мм рост их прекращается. Максимальное повышение предела текучести для исследованных сталей и толщин полос колеблется в пределах 60...80 %, а временного сопротивления 20...40%. Это позволяет увеличить несущую способность гнутых профилей и получить экономию металла в результате уменьшения их толщины.

4. Оптимальная высота рифлений, обеспечивающая максимальное упрочнение, составляет 1,4...1,6 мм. Минимальная высота должна быть не менее 0,6...0,9 мм, так как ей соответствует минимальное значение момента сопротивления сечения при изгибе и допустимая нагрузка остается практически такой же, как и для гладких полос.

## Литература

1. Тришевский О.И. Определение механических свойств гнутых профилей расчётным методом / О.И. Тришевский, Е.А. Гончаренко // Вісник ХНТУСГ вип.76 „Технічний сервіс АПК, техніка та технологія у с/г машинобудуванні”. – 2009. – С.176-181.

2. Богоявленский К.Н. Гнутые профили проката / К.Н. Богоявленский, Д.М. Ясев, В.В. Рис // Научн. труды УкрНИИмет. – 1976. – Харьков: изд. УкрНИИмет. – С.52-56.

3. Тришевский О.И. Нанесение упрочняющих рифлений на плоские элементы гнутых профилей как фактор снижения металлоёмкости продукции / О.И. Тришевский, Е.А. Гончаренко, С.Н. Бондаренко // Вісник ХНТУСГ вип.115 „Технічний сервіс АПК, техніка та технології у с/г виробництві”. – 2011. – С.31-35.



### Trishevsky O.I. **Strain hardening of rolled bent profiles**

The paper describes the features of the new technology of strain hardening flat portions bent rolled shapes by forming on the work piece by local exhaust small longitudinal corrugations. The results of studies of magnitude and nature of changes in the mechanical properties of the cross section of non-reinforced and reinforced ( corrugated ) profiles. The influence of the height of the formed corrugations on the degree of strain hardening varietal bent profiles.

New technology allows you to increase the carrying capacity of the bent structures of metal and savings by reducing their thickness.

**Keywords:** bent profiles, work hardening, longitudinal corrugations, mechanical properties, tensile strength, yield strength, elongation, reduction of metal

### **References**

1. Trishevsky O.I. Opredelenie mehanicheskikh svoistv gnutih profilei raschetnim metodom / O.I. Trishevsky, E.A.Gonchrenko // Visnik HNTUSG vip.76 "Tehnichniy servis APK, tehnika ta tehnologija u s/g mashinobuduvanni". – 2009. S.71-181.
2. Bogojavlenskiy K.N. Gnutie profile prokata / K.N. Bogojavlenskiy, D.M.Jasev, V.V.Ris // Nauchn. trudi UkrNIImet.– 1976.– Charkov: izd.UkrNIImet. – S.52-56.
3. Trishevsky O.I. Nanesenie uprochnjajuschih riflenij na ploskie elementi gnutih profilei, kak faktor snijeniya metallojomkosti produkcii / O.I. Trishevsky, E.A.Gonchrenko, S.N.Bondarenko // Visnik HNTUSG vip.115 "Tehnichniy servis APK, tehnika ta tehnologiji u s/g virobnictvi". – 2011. S.31-35.