

УДК 623.4.01

UDC 623.4.01

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ КАЧЕСТВО
ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ
ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ**

**RESEARCH OF THE FACTORS
DETERMINING THE QUALITY OF THE
SURFACE WHILE DETAILS RESTORATION
WITH THE METHOD OF THERMO
DYNAMICAL HARDENING**

Зубрилина Елена Михайловна
к.т.н., доцент

Zubrilina Elena Mixailovna
Cand.Tech.Sci., associate professor

Зубенко Елена Васильевна
ст.преподаватель
*Ставропольский государственный аграрный
университет, Ставрополь, Россия*

Zubenko Elena Vasilievna
senior lecturer
*Stavropol State Agrarian University, Stavropol,
Russia*

Проведено сравнение качества обработки поверхностей валов из различных материалов холодным и горячим деформированием при ремонте изношенных деталей сельскохозяйственной техники. Предложена методика проведения экспериментов. Исследовано влияние режимов обработки на качество поверхностного слоя (параметры шероховатости поверхности) детали

The comparison of the quality of the processing of surfaces of shafts made of various materials with cold and hot deformation in the repair of worn-out parts of agricultural machinery has been made in the article. The technique of the experiments was proposed. The effect of the treatment regimes on the quality of the surface layer (surface roughness) of the details was examined

Ключевые слова: МЕХАНИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ, ПОВЕРХНОСТНО-
ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ,
НАГРЕВ ДЕТАЛИ, МЕТОД
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

Keywords: MACHINING BY CUTTING,
SURFACE-PLASTIC DEFORMATION, HEATING
OF THE DETAILS, METHOD OF THERMO-
DYNAMICAL HARDENING

Одной из основных задач ремонта сельскохозяйственной техники является ускорение технологического процесса восстановления изношенных поверхностей деталей, с целью уменьшения простоя машин и агрегатов во время полевых работ [1], однако при этом не должно снижаться качество ремонтных работ. Кроме того не каждое сельскохозяйственное предприятие имеет специализированное оборудование и инструмент для восстановления работоспособности деталей и узлов.

На основании этого нами предложен способ поверхностно-пластического деформирования заключающийся в механической обработке резанием с нагревом и одновременным пластическим деформированием [2], позволяющий существенно сократить время технологического процесса обработки наплавленных деталей и при одной

установке детали получить поверхность, не требующую последующей финишной обработки.

В ходе экспериментальных исследований нами определялись параметры шероховатости поверхностей деталей, обработанные различными способами.

Установлено, что процесс резания нагретого до температур разупрочнения металла позволяет получить меньшие параметры шероховатости. По результатам исследования резания с нагревом и холодного точения металла построены графики зависимости $R_a = f(V)$ параметров шероховатости от температуры (T , °C) и скорости обработки (V) при постоянной подаче ($S = \text{const}$) (рисунок 1).

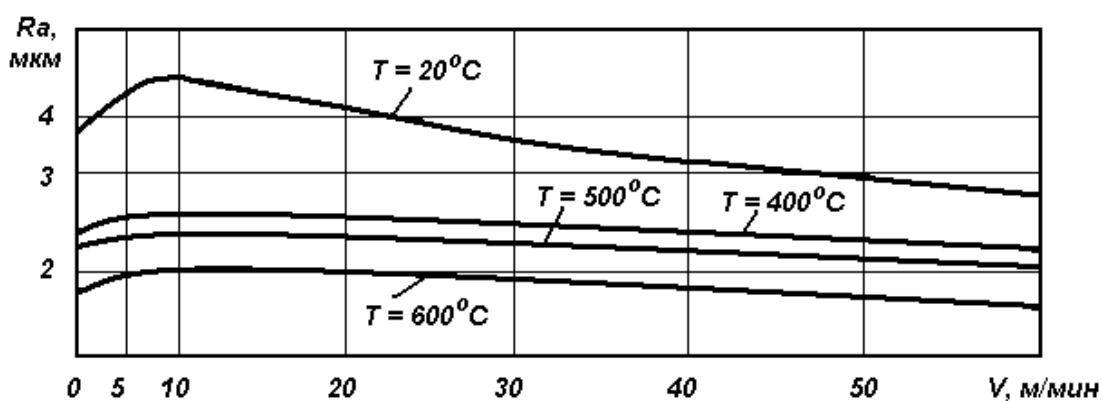


Рисунок 1 – Зависимость параметров шероховатости стали от температуры и скорости обработки при постоянной подаче при холодном резании и обработке с нагревом

Процесс накатывания нагретой до температуры разупрочнения поверхности детали широким, охлаждаемым водой роликовым накатником показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Обработка нагретой поверхности детали охлаждаемым водой роликовым накатником с шириной кольца роликового подшипника 11 мм

Накатывание проводили на длине 50 мм с продольной подачей, затем менялась величина давления на ролик. Часть экспериментов проводилась роликом, жестко связанным с закрепленным в резцедержателе режущим инструментом. В этом случае процесс резания с нагревом совмещался с процессом поверхностной пластической деформации (ППД) нагретой поверхности детали. С целью изменения величины давления был сконструирован прижимной механизм «винт-гайка». Создаваемое давление замерялось силовым динамометром с пружиной сжатия, градуированным на диапазон усилий от 100 до 500 Н.

Результаты обработки нагретой поверхности детали из стали 45 резанием с нагревом при различных режимах обработки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Шероховатость обработанных поверхностей детали из стали 45

№ п/п	Режимы резания с нагревом					Режимы накатывания нагретой до 450°C поверхности			Шероховатость, <i>Ra</i> , мкм	
	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , мм	<i>n</i> , мин ⁻¹	<i>T</i> , °C	<i>Ra</i> , мкм	<i>S</i> , мм/об	<i>n</i> , мин ⁻¹	<i>P</i> , Н		
1	0,15	2,0	350	500	1,22	0,15	350	200	0,7	
			500		1,27				500	0,7
			800		1,25				800	0,6
			1200		1,20				1200	0,6
			1600		1,15				1600	0,5
2	0,28	4,0	350	600	1,30	0,28	350	400	0,5	
			500		1,31				500	0,5
			800		1,29				800	0,4
			1200		1,28				1200	0,4
			1600		1,26				1600	0,3

Результаты обработки нагретых поверхностей детали из стали 40Х, обработанных резанием с нагревом при тех же режимах резания и накатывания, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Шероховатость обработанных поверхностей детали из стали 40Х

№ п/п	Режимы резания с нагревом					Режимы накатывания нагретой до 450°С поверхности			Шероховатость, Ra, мкм	
	S, мм/об	t, мм	n, мин ⁻¹	T, °С	Ra, мкм	S, мм/об	n, мин ⁻¹	P, Н		
1	0,15	2,0	500	500	1,20	0,15	500	200	0,60	
			800		1,20				800	0,50
			1200		1,15				1200	0,50
			1600		1,15				1600	0,40
2	0,28	4,0	500	600	1,20	0,28	500	400	0,40	
			800		1,15				800	0,35
			1200		1,15				1200	0,30
			1600		1,10				1600	0,25

С целью исследования результатов силового воздействия на холодный и нагретый до температур разупрочнения металла определены усилия давления ролика при накатывании на вершины шероховатости до полного их смятия. При этом прочность металла и модуль упругости в зависимости от температуры нагрева имеют тенденции к уменьшению.

При накатывании роликом нагретой поверхности детали длина дуги L, контактирующей с вершинами шероховатости R_z, определяется по формуле:

$$L = \sqrt{[R^2 + (R - R_z)^2 - 2R(R - R_z) \cos \alpha]}, \quad (1)$$

где R – радиус давящего ролика, мм;

R_z – шероховатость поверхности детали, мм;

$\cos \alpha = (R - R_z) / R$.

Усилие давления ролика, учитывающее смятие материала, рассчитывается из выражения:

$$P = \sigma_T \cdot F \cdot \frac{E_1}{E_2}, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести материала обрабатываемой детали, МПа;

F – площадь контакта ролика с нагретой поверхностью детали (мм²), определяемая произведением длины дуги L и ширины кольца роликового подшипника l (F = L × l);

E_1, E_2 – модули упругости соответственно разогретого и холодного металла (таблица 3).

При расчете усилия давления для давящего водоохлаждаемого материала ролика при $T_n = 20^{\circ}\text{C}$ принимаем $E \times 10^{-2} = 2150$ МПа, а для нагретого материала детали до $T_n = 750^{\circ}\text{C}$ – $E \times 10^{-2} = 1300$ МПа (см. табл. 3).

Таблица 3 – Значения модулей упругости и предела текучести нагретого и холодного металла, МПа

Материал	$T_n = 20^{\circ}\text{C}$		$T_n = 250^{\circ}\text{C}$		$T_n = 750^{\circ}\text{C}$	
	$E \times 10^{-2}$	σ_T	$E \times 10^{-2}$	σ_T	$E \times 10^{-2}$	σ_T
Сталь конструкционная	205	22	200	18	130	12
Сталь жаропрочная	215	40	210	42	150	30

Тогда усилие давления, приложенного к ролику P (Н) при заданных исходных данных, составит:

$$P = 12 \cdot 7,25 \cdot \frac{130}{215} = 52,6 \text{ кг} \approx 516 \text{ Н.}$$

При накатывании холодного металла с целью смятия вершин шероховатости и «закатывания» их во впадины потребуется усилие, равное

$$P = 22 \cdot 7,25 \cdot \frac{205}{215} = 152,08 \text{ кг} \approx 1491,9 \text{ Н,}$$

т.е. почти в три раза больше, чем при накатывании «нагретого» металла.

По данным экспериментов накатывания нагретых до температуры $500...600^{\circ}\text{C}$ деталей из стали 45 и стали 40Х построены графики зависимости шероховатости поверхности от усилий, приложенных к ролику (рисунок 4).

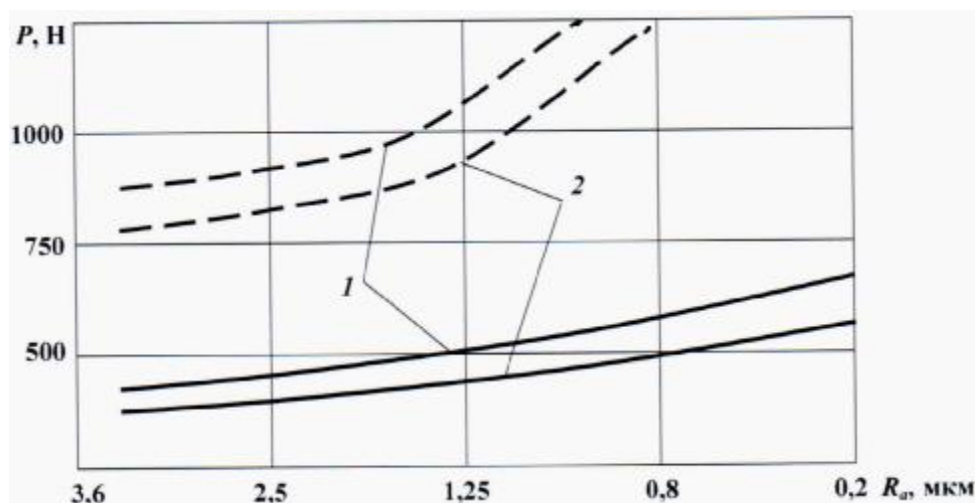


Рисунок 4 – Зависимость шероховатости поверхности от усилия давления ролика при ППД нагретого металла: 1 – сталь 40Х; 2 – сталь 45

— — — — — зависимость, полученная при ППД «холодного» металла;
 ————— результаты ППД нагретой поверхности детали до $T = 500^{\circ}\text{C}$

Как видно из результатов ППД с нагревом для двух марок металла (ст.45 и ст.40Х) прослеживаются близкие параметры шероховатости. Причем изменение давления ролика на нагретую поверхность приводит к снижению параметров шероховатости. Как показали эксперименты (см. рисунок 4), увеличение усилия давления свыше 1,5 кН приводит к росту шероховатости накатываемой нагретой поверхности. При этом данное явление можно объяснить налипанием металла на ролик и вырывом частиц металла с поверхности детали при накатывании.

Полученная шероховатость поверхности после деформирования широким роликом с водяным охлаждением сопоставима с отделочными этапами тонкого шлифования. Процесс деформирования широким роликовым накатником с охлаждением нагретой поверхности резко отличается от обработки поверхности роликовым накатником без охлаждения тем, что не происходит образования ступеней. Поверхность детали при этом получается гладкой с зеркальным блеском. Фотография накатывания наплавленной поверхности широким роликом в результате такой обработки показана на рисунке 5.



Рисунок 5 – Фотография поверхности детали обработанной резанием с нагревом и последующей ППД с подачей охлаждающей жидкости на вращающийся ролик

Дополнительно были также проведены экспериментальные исследования по накатыванию, нагреваемых до температуры свыше 800°C наплавленных предварительно обработанных резанием с нагревом поверхностей широким водоохлаждаемым роликом. При этом испытания широкого роликового накатника проводили на образцах, обработанных резанием с нагревом.

Анализ полученных результатов показывает, что шероховатость обработки широким роликовым накатником зависит от температуры нагрева и усилия, приложенного роликом к поверхности, и незначительно – от частоты вращения и величины подачи ролика. При этом практически получается «горячее» выглаживание наплавленного металла при накатывании широким роликом, особенно при обработке деталей с медными сплавами.

Результаты замеров шероховатости у поверхностей, обработанных резанием с нагревом (исходная шероховатость) и накатыванием роликовым накатником по нагретой поверхности пламенем горелки до 450°C , спаренным с режущим инструментом широким охлаждаемым водой роликом, и результатами накатывания холодной поверхности, сведены в таблицу 4.

Результаты экспериментальных исследований показали, что в результате накатывания холодной поверхности шероховатость оказалась выше (в 5...6 раз) шероховатости накатанной тем же роликом нагретой поверхности.

Таблица 4 – Результаты замеров шероховатости поверхности роликовым накатником

Исходная шероховатость поверхности детали, <i>Ra</i> , мкм			Шероховатость после обкатки нагретой поверхности, <i>Ra</i> , мкм			Шероховатость после обкатки холодной поверхности, <i>Ra</i> , мкм		
Результаты замеров			Результаты замеров			Результаты замеров		
I	II	III	I	II	III	I	II	III
2,8	2,8	2,8	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	0,8
2,8	3,0	3,0	0,5	0,5	0,6	0,8	0,9	0,8
2,8	2,8	2,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
2,6	2,5	2,4	0,4	0,3	0,3	0,7	0,7	0,8

Шероховатость поверхности детали из стали 40Х после ППД охлаждаемым роликом нагретой до высокой температуры поверхности детали при усилии давления ролика равном 500 Н приведена в таблице 5. Результаты обработки поверхностей холодным резанием (чистовым этапом токарной обработки) и предварительным шлифованием приведены в таблице 6.

Таблица 5 – Параметры шероховатости поверхностей стальных деталей, обработанных резанием с нагревом проходным упорным резцом после ППД охлаждаемым роликом

№ п/п	Режимы резания с нагревом проходным упорным резцом					Режимы накатывания поверхности				Шероховатость, <i>Ra</i> , мкм
	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , мм	<i>n</i> , мин ⁻¹	<i>T</i> , °С	<i>Ra</i> , мкм	<i>S</i> , мм/об	<i>n</i> , мин ⁻¹	<i>T</i> , °С	<i>R</i> _{пр} , мм	
1	0,15	2,0	300	450	1,25	0,15	300	600	12,5	0,4
			500		500		0,4			
			800		800		0,3			
			1200		1200		0,2			
			1600		1600		0,2			
2	0,28	4,0	300	500	1,30	0,10	300	700	12,5	0,3
			500		500		0,3			
			800		800		0,2			
			1200		1200		0,1			
			1600		1600		0,1			

Таблица 6 – Параметры шероховатости поверхностей стальных деталей, обработанных холодным резанием

№ п/п	Режимы холодного резания					Режимы холодного шлифования поверхности			Шероховатость, <i>Ra</i> , мкм
	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , мм	<i>n</i> , мин ⁻¹	<i>T</i> , °С	<i>Ra</i> , мкм	<i>S</i> , мм/об	<i>n</i> , мин ⁻¹	<i>t</i> , мкм	
1	0,15	0,4	800	20	3,20	0,15	1000	20	0,85
			1200		3,40		1600		0,80
			1600		3,20		2000		0,75
2	0,28	0,2	800	20	3,30	0,08	1000	10	0,60
			1200		3,25		1500		0,55
			1600		3,10		2000		0,55

Результаты сравнительного анализа таблиц 5 и 6 показали, что увеличение температуры нагрева поверхности при накатывании приводит к снижению параметров шероховатости. При нагреве поверхности газовой горелкой в интервале 600...700°C величины параметров шероховатости при обработке нагретого металла снижаются почти в два раза по сравнению с холодным накатыванием и ППД нагретой до 450...550°C поверхности и достигают параметров, получаемых при чистовой (финишной отделочной) обработке металла резанием. При этом шероховатость обработанной пластическим деформированием холодной поверхности несколько грубее.

С целью оценки степени деформации металла после ППД обработанной резанием с нагревом и обкатанной роликом поверхности были произведены замеры величин микротвердости. Микротвердость замерялась в трех сечениях (начале, середине и конце полосы), образованной в результате резания трех валков наплавленного металла на заготовку с использованием прибора ПМТ-3.

Микротвердость поверхности, обработанной ППД с нагревом, занимает промежуточное положение между величинами деформированного холодного металла и получающимися значениями микротвердости после резания металла с нагревом.

Исследование микротвердости поверхностных слоев металла обработанного резанием с нагревом показало полное отсутствие наклепа. У образцов, изготовленных из деталей, обработанных холодным резанием, наклеп имеет место. Результаты сравнительного исследования приведены в таблице 7.

Как видно из таблицы, показатели микротвердости на образцах холодного резания имеют значительные величины, которые сопоставимы с известными результатами. У образцов резания нагретой детали эти

показатели малы и соответствуют микротвёрдости не наклепанного металла [1].

Таблица 7 – Результаты сравнительного исследования микротвёрдости обработанных поверхностей резанием с нагревом наплавленных деталей

№ п/п	Микротвёрдость H_{μ} образцов холодного точения, МПа		Микротвёрдость H_{μ} образцов резания с нагревом, МПа	
	образец №1	образец №2	образец №3	образец №4
1.	4549	5127	1256	1386
2.	4196	4871	1199	1071
3.	5438	5823	1288	1765
4.	4006	4025	1560	1290
5.	3899	3755	1688	1011
6.	2750	2198	1797	1280
7.	3111	3254	1253	1267
8.	4786	4197	1872	1388
9.	5987	5007	1308	1363
10.	2786	2544	1644	2070
11.	4255	3383	2070	1059
12.	2111	2588	1969	1397

Результаты проведенных экспериментальных исследований ППД охлаждаемой водой нагретых металлических изделий по ходу совмещенного процесса резания (таблица 8) показали наличие наклепа на их поверхности. При этом было отмечено повышение микротвердости поверхности по сравнению с результатами замеров после холодного резания.

Как показали проведенные замеры микротвердости, обкатанной данным роликом нагретой поверхности (с температурой 450...550°C), увеличение длины контакта ролика с поверхностью при его продольной подаче позволяет значительно повысить качество поверхностного слоя деформированного нагретого металла.

Удлинение контакта благотворно сказалось в том, что жесткость конструкции накатника увеличилась и этим накатником можно проводить поверхностно-пластическое деформирование со значительными величинами продольной подачи и скоростями вращения обрабатываемых деталей.

Таблица 8 – Результаты исследования микротвёрдости H_u

№ п/п	Микротвёрдость H_u нагретой поверхности металла, обработанной термодинамическим методом, МПа		Микротвёрдость H_u поверхности совмещенного процесса резания нагретого металла с охлаждением водой, МПа	
	образец №1	образец №2	образец №3	образец №4
1.	3387	3312	5064	5030
2.	3210	3781	5101	4876
3.	3108	3955	4873	4128
4.	4065	4129	4721	4601
5.	3923	3870	4755	4651
6.	3556	3777	4091	4120
7.	2997	2883	3785	3508
8.	2891	2933	3456	3007
9.	2779	3158	3665	3200

Процесс поверхностно-пластического деформирования поверхности, охлаждаемой водой, подаваемой на ролик накатника, отличается тем, что металл испытывает не только давление, но и тепловой удар при охлаждении, который изменяет структуру тонкого поверхностного слоя. При этом в поверхностный слой вминаются не только вершины шероховатости, но и измельчается структура металла. Микротвердость поверхности детали при этом увеличивается. Структура металла в поверхностном слое, претерпев резкое охлаждение, изменилась.

При давлении на поверхностный слой выделяется дополнительная энергия, которая в микрообъёме смятого роликом металла резко поднимает температуру выше температуры перекристаллизации. Это приводит к образованию условий перехода аустенита в небольшое количество мартенсита в узком приповерхностном слое сдвиговых деформаций. Такое улучшение структуры упрочняет поверхность детали и делает её более твердой.

Из теории термической обработки стали известно, что наблюдаемое упрочнение сплавов достигается действием прогрева поверхностного слоя до температуры перекристаллизации, а затем резкого охлаждения с целью фиксации полученной структуры. Такое упрочнение объясняется суммарным влиянием повышенного числа дефектов в металле

(дислокаций), возникающих в процессе нагрева и их деформационным уплотнением при термопластическом деформировании с одновременным охлаждением.

После такой обработки в сварных и наплавленных деталях получается сочетание достаточно высокой твердости и прочности с хорошей упругостью и вязкостью металлических поверхностей, что в конечном итоге повышает долговечность и работоспособность изделий машиностроения.

ВЫВОДЫ:

1. При резании наплавленных деталей с нагревом необходимо соблюдать оптимальные температурные режимы резания в пределах 550...650°C. Для резания наплавленного металла глубиной 4 мм поверхность детали должна быть нагрета до температуры 950...1000°C, что позволило обеспечить наименьшие величины усилия резания до 520, 565 и 635 Н/мм² и износ режущего инструмента 10, 8 и 6 соответственно.

2. Тепловое воздействие на режущий инструмент при резании с нагревом при установленных оптимальных температурных режимах по сравнению с холодным резанием уменьшается примерно на 15...20%. При этом наблюдается наивысшая стойкость инструментов. Шероховатость поверхности детали после отдельной обработки широким роликовым накатником зависит от температуры нагрева и незначительно – от числа оборотов и величины подачи ролика. Шероховатость накатанной шариком с нагревом поверхности по сравнению с накатанной роликом шероховатостью снизилась в 10...12 раз при оптимальной глубине обработки $t = 0,05$ мм и ширине ролика 11 мм.

3. Исследования показали преобладание регулярной шероховатости на поверхности наплавленных деталей, обработанных резанием поясков проходными отогнутыми резцами с углом в плане $\varphi = 45^\circ$. Результаты

замеров шероховатости поверхностей, полученные при резании «холодного» и нагретого металлического слоя, позволили установить рациональные режимы резания, накатывания и нагрева при разработке технологии обработки наплавленных и сварных поверхностей.

4. По установленным параметрам и рассчитанным режимам обработки для обеспечения устойчивости функционирования предложенного технологического процесса спроектирована и опробована конструкция роликового накатника, спаренного с режущим водоохлаждаемым инструментом. Для обеспечения жесткости резца и предотвращения потери прочности накатник выполнен с водяным охлаждением. При этом интенсивность подачи воды на роликовый накатник обеспечивает его сохранность при силовом контакте с деталью, нагретой до температуры 700°C.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Термодинамическое упрочнение сварных и наплавленных изделий сельскохозяйственного машиностроения: монография / Е.М. Зубрилина, Е.В. Зубенко, И.Н. Кравченко, А.В. Шиян. – Ставрополь.: АГРУС, 2012. – 392 с.

2. Кравченко И.Н. Термопластическое упрочнение металлических поверхностей сварных и наплавленных деталей / И.Н. Кравченко, А.В. Шиян, Е.М. Зубрилина // Сварочное производство. - 2012. - № 2., С. 20-27.

3. Кравченко И.Н. Обработка корпусных чугуновых заготовок резанием с нагревом. / И.Н. Кравченко, Е.В. Зубенко, Е.М. Зубрилина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2012. – №2., С. 29 – 31.