

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА



УДК 631.3.02:621.793.927.7

**А.Ю. Балаганский,  
В.В. Иванайский,  
Н.Т. Кривочуров,  
В.П. Тимошенко,  
А.С. Шайхудинов,  
А.В. Ишков**

## УПРОЧНЕНИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ ОДНОСТОРОННЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ\*

**Ключевые слова:** упрочнение поверхности, ТВЧ-нагрев, твердый сплав, рабочие органы сельхозтехники, автоматическая технология, износ.

### Введение

Среди используемых в настоящее время конструкций почвообрабатывающих органов сельхозтехники и рабочих органов (РО) других машин большую долю составляют плоские детали, длина ( $l$ ) которых значительно (в 3-10 раз) превосходит остальные габаритные размеры. Толщина ( $h$ ) таких длинномерных РО, как правило, задается параметрами товарного проката конструкционных и легированных

сталей (5-30 мм), а ширина ( $b$ ) колеблется в интервале 45-160 мм. Такая форма РО обеспечивает высокую технологичность их изготовления в 2-3 операции, а их длинная режущая кромка упрочняется методами напыления, химико-термической обработки или индукционной наплавки [1]. Примерами длинномерных РО сельхозтехники являются: лемех предплужника ПЛЖ 02.701, полевая доска П01.580, долотообразный лемех С01.702А, лемех КША 07.030, отношение  $l/d$  которых составляет 2,9; 3,4, 5,2 и 9,6 соответственно [2]. Еще больших значений этот параметр достигает у ножей дорожных землеройных машин ДЗ.118.10.001, имеющих габаритные размеры ( $l \times d \times h$ ) 1500×400×30 мм, при этом ширина наплавляемого участка поверхности состав-

\* Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного грантом РФФИ № 11-08-98016-р\_сибирь\_а.

ляет 80-150 мм. У длинномерных РО относительно небольшой по площади упрочняемый участок их поверхности обеспечивает нормальное функционирование всей детали, поэтому здесь к качеству наплавки предъявляются повышенные требования.

Цель настоящей работы – выявление основных факторов, влияющих на структуру наплавленного слоя и разработка конструкции индуктора для односторонней индукционной наплавки длинномерных деталей с получением качественного износостойкого покрытия.

### Экспериментальная часть

В качестве длинномерных РО, упрочняемых индукционной наплавкой твердого сплава, исследовались: полевая доска П01.580, лемех КША 07.030, лемех ПЛЖ 02.701, отштампованные из стали 65Г, а также нож землеройной машины ДЗ.118.10.001, выполненный из стали 15ХСНД.

Упрочнение РО осуществлялось наплавкой высоколегированного хромистого чугуна ПГ-С27 из шихты, содержащей 85 мас.% твердого сплава и 15 мас.% плавящего боратного флюса П-0,66 [3]. Для индукционной наплавки использовался высокочастотный промышленный генератор ВЧГЗ-160/0,066 на следующих режимах: анодный ток 10 А, сеточный ток 2,5 А, анодное напряжение 10-12 кВ.

Для контроля температуры шихты и поверхности упрочняемой детали использовали хромель-алюмелевые микротермопары ХА с диаметром шарика 0,2 мм, которые с помощью конденсаторной контактной сварки приваривали к детали или на 3/4 погружали в шихту. Измерения осуществляли следующим образом. После предварительной калибровки термопару подключали к АЦП К57ПВ1А и осуществляли считывание, оцифровку и передачу на персональную ЭВМ (с установленным на ней ПО регистрации данных (ADC.com) и чтения данных и калибровки устройств (ADC.mcd), функционирующем в системе «Mathcad») ее показаний со скоростью до 36 с<sup>-1</sup>, что позволяло фиксировать быстропротекающий процесс индукционного нагрева. Для серии параллельных измерений температуры использовали по три образца. Общая погрешность измерения температуры при таком аппаратном оформлении с использованием ПА-комплексом не превысила 4,5%.

У полученных покрытий была исследована микроструктура (МИМ-7), твердость (ПМТ-3, нагрузка 100 г), фазовый (ДРОН-2) и химический состав (спектрометр FOUNDRI – MASTER).

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 приведены чертежи длинномерных РО сельхозтехники с указанием расположения на них участков, упрочняемых индукционной наплавкой. К таким деталям из-за ограничения по мощности коммерческих ВЧ-генераторов и с точки зрения экономии электроэнергии предпочтительно применение одностороннего непрерывно-последовательного способа индукционной наплавки, при котором электромагнитное поле индуктора воздействует только на наплавляемый участок поверхности детали [4]. При этом учитывая размеры и геометрию РО, условия теплоотвода от поверхности вглубь детали по ее ширине различные. Кроме того, при наплавке длинномерных деталей в массовом производстве возникают дополнительные проблемы непостоянства размеров и разнотолщинности проката, что также приводит к неравномерному нагреву упрочняемой поверхности, а в последующем – к перегреву наплавочной шихты. Общее ухудшение качества упрочняемого слоя возникает вследствие наложения этих факторов [1].

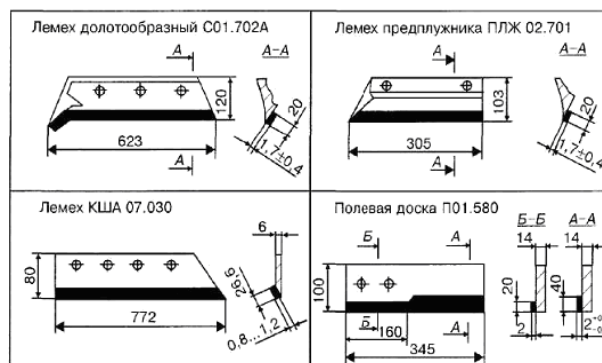


Рис. 1. Длинномерные рабочие органы сельхозтехники, упрочняемые индукционной наплавкой твердых сплавов

Кроме указанных выше факторов, как установлено нами, на качество наплавленного слоя влияет и неравномерность нагрева образца на границах шихта – основной металл и шихта – воздух из-за происходящих в шихте металлургических процессов, разной дисперсности частиц твердого сплава, различной теплоемкости и температурах плавления ПГ-С27, боратного флюса и его компонентов.

На рисунке 2 приведены обобщенные экспериментальные зависимости температуры на границах шихта – основной металл и шихта – воздух от времени, при нагреве образцов из сталей 65Г, 15ХСНД и максимальной вводимой мощности, которые показывают принципиальное различие в механизмах ТВЧ-нагрева шихты и поверхности детали под ее слоем.

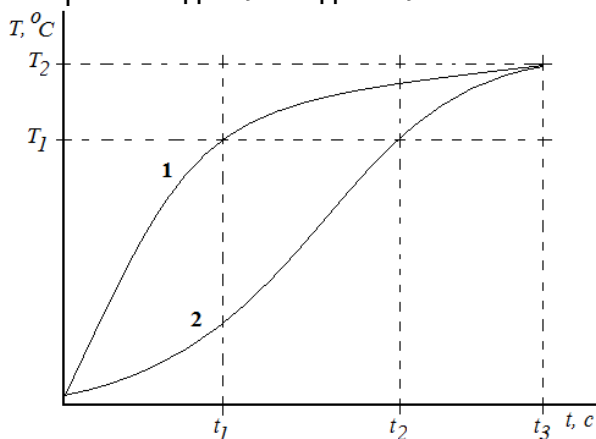


Рис. 2. Обобщенная зависимость температуры на границах шихта – основной металл (1) и шихта – воздух (2) от времени

Как следует из рисунка 2, наблюдается как минимум три временных стадии, отличающиеся интенсивностью нагрева шихты и основного металла.

На первой стадии ( $t_0-t_1$ ) на границе основной металл-шихта происходит интенсивный рост температуры до  $T_1$ , которая для сплава ПГ-С27 достигает  $800-850^\circ\text{C}$ , в зависимости от марки стали, а на границе шихта – воздух она достигает лишь  $100-150^\circ\text{C}$ . В этот период времени по толщине наплавочной шихты имеет место максимальный температурный градиент. В конце первой стадии вследствие достижения высокой температуры упрочняемой поверхности на ней образуются отдельные участки расплавленного флюса, который активно взаимодействует с окисными пленками и подготавливает поверхность основного металла для образования металлических связей с твердым сплавом. А из наплавочной шихты удаляется адсорбционная и кристаллизационная влага. По времени эта стадия занимает порядка 30%.

Вторая стадия процесса ( $t_1-t_2$ ) характеризуется снижением интенсивности нагрева основного металла в 3-4 раза, но увеличивается скорость нагрева наплавочной шихты. В этот промежуток времени происходит разложение и гидролиз, буры, плавление компонентов флюса. По всему слою наплавочной шихты протекают реак-

ции взаимодействия между окислами твердого сплава и компонентами флюса ( $\text{CaSi}_2$ ), происходит растворение окислов в основном компоненте флюса –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , взаимодействие между кислотными и основными оксидами. По мере распространения температуры по сечению шихты расплавленный флюс стекает между зернами твердого сплава в зону максимальных температур, и на поверхности основного металла образуется система, состоящая из расплавленного флюса, шлака и частиц твердого сплава. Вследствие расплавления флюса и зерен твердого сплава фронт плавления послойно движется вверх по шихте. В этот период заканчивается плавление флюса. Из-за высокой термодинамической активности углерод и бор диффундируют в основной металл, что вызывает образование и рост доэвтектических зон. Продолжительность стадии составляет 45-55% общего времени ТВЧ-нагрева.

На третьей стадии ( $t_2-t_3$ ) интенсивность нагрева несколько понижается. На контактирующих поверхностях между зернами твердого сплава и основного металла образуется легкоплавкая эвтектика, имеющая для системы ПГ-С27 – флюс П-0,66, температуру плавления  $\sim 1080^\circ\text{C}$ . Уменьшается температурный градиент по сечению наплавленного слоя, и в конце он практически исчезает. Кроме того, происходит интенсивное плавление зерен сплава, и на поверхности основного металла образуется жидкая ванна [5]. Эта стадия характеризуется интенсивным взаимодействием шлака с наплавляемым сплавом и сплава с основным металлом.

Следует отметить, что при расплавлении порошковых смесей (псевдосплавов) ПС-14-80, ПС-14-60 и других нерасплавившиеся нативные частицы псевдосплава остаются в упрочняемом слое и до завершения процесса плавления наплавочной шихты, в то время как в монофазных высоколегированных хромистых белых чугунах ПГ-УС25, ПГ-С27 и других зерна твердого сплава растворяются полностью, поэтому их использование и оказывается более предпочтительным [1].

В конце третьей стадии процесс плавления завершается полностью. Технологически здесь должно быть достаточно времени, чтобы успели пройти все металлургические и иные процессы: всплытие шлака, отделение газовых пузырей, раскисление и пр.

Таким образом, время и температура нагрева на каждой из указанных стадий также определяют качество наплавленного слоя. А так как во всех случаях интенсивность нагрева шихты на первой стадии процесса резко отстает от интенсивности нагрева основного металла, то для получения качественного упрочняющего покрытия при односторонней индукционной наплавке длинномерных РО сельхозтехники требуется изменение конструкции индуктора и организация на наплавляемой поверхности детали двух зон – зоны предварительного подогрева и зоны догрева.

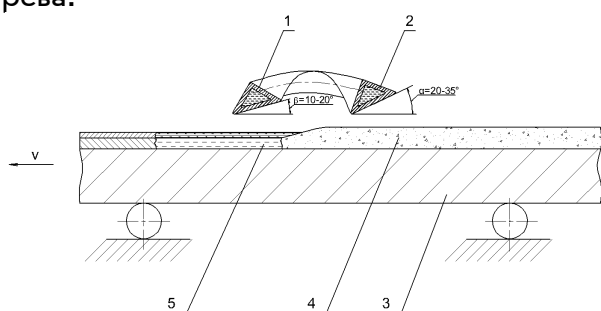


Рис. 3. Индуктор для автоматической односторонней наплавки и схема осуществления 2-зонной наплавки

Конструктивно эти зоны могут быть выполнены путем поворота ветвей плоского петлевого индуктора на разные углы относительно плоскости детали. На основании результатов проведенных ранее исследований установлено, что первая ветвь индуктора должна обладать наклоном грани под углом  $20-35^{\circ}$ , а вторая – под углом  $10-20^{\circ}$  к поверхности нагрева, а оптимальная скорость перемещения детали под индуктором ( $v$ ) должна составлять  $3-3,5$  мм/с, с поочередным проходом обеих зон (рис. 3) [6].

При 2-зонном нагреве расширена нагреваемая зона наплавляемого участка, вследствие чего увеличивается как время протекания металлургических процессов, так и время плавления твердого сплава. При оптимальном ориентировании ветви подогрева под ней осуществляется процесс интенсивного нагрева, необходимый на начальной стадии плавления, а конечная стадия плавления ведется при значительно меньших удельных мощностях и, следовательно, при меньшей температуре поверхности наплавляемой детали, не превышающей максимально допустимой, под ветвью догрева.

На основе проведенных исследований нами была проведена односторонняя ав-

томатическая индукционная наплавка длинномерных ножей ДЗ.118.10.001 и исследованы характеристики получающихся покрытий. На рисунке 4 представлена микроструктура наплавленного сплава ПГ-С27 и зоны сплавления на стали 15ХСНД.



Рис. 4. Микроструктура наплавленного сплава ПГ-С27 на стали 15ХСНД:  
1 – граничная полоска;  
2 – дендриты аустенита;  
3 – карбидная эвтектика;  
4 – первичные карбиды

Микроструктура твердого сплава соответствует стадии полного расплавления шихты, а в наплавленном слое в процессе кристаллизации образовались все зоны [1, 5]. Граничная полоска имеет толщину от  $0,008-0,01$  мм, на долю наименее износостойкой до эвтектической зоны приходится  $20-30\%$  от общей толщины упрочняющего покрытия, эвтектическая зона составляет  $8-10\%$ , остальное – сверхтвердая заэвтектическая зона, содержащая различные карбидные фазы. Микротвёрдость (НV) структурных составляющих исследуемого сплава приведена ниже:

граничная полоска	414-480;
дендриты аустенита	414-600;
карбидная эвтектика	390-450;
первичные карбиды	1400-1760.

Твёрдость всего наплавленного слоя составила  $50-53$  HRCэ.

Металлографическим анализом установлено, что в составе заэвтектической, эвтектической и доэвтектической зон присутствуют  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазы. Послойным исследованием наплавленного металла установ-

лено, что основным карбидом во всех зонах является соединение типа  $(Cr,Fe)_7C_3$  а карбид  $(Cr,Fe)_3C$  образует лишь отдельные включения.

Химический состав основной заэвтектической зоны следующий: С > 4,50%; Si – 2,50%; Mn – 1,23%; Cr – 31,20%; Ni – 1,24%. Химический состав покрытия не соответствует рецептурному составу твёрдого сплава ПГ-С27, по хрому ~ на 3%, по никелю ~ 0,7%, однако это не является браковочным признаком. Износостойкое покрытие по основной структуре и фазовому составу отвечает требованиям, предъявляемым к наплавленному слою. Основополагающим фактором является размер до эвтектической зоны, которая в наплавленном слое не превышает 30%.

### Выводы

1. Исследованы процессы нагрева на границах шихта – основной металл и шихта – воздух при односторонней автоматической индукционной наплавке длинномерных плоских деталей. Установлено, что скорости нагрева шихты и поверхности детали не совпадают, что вызывает ухудшение качества упрочняющего покрытия.

2. Разработан и изготовлен индуктор для односторонней автоматической непрерывно-последовательной наплавки в двух зонах: зоне интенсивного нагрева упрочняемой поверхности и плавления шихты – разогрева и зоне, где температура поддерживается на уровне температуры плавления твёрдого сплава – догрева.

3. Проведена односторонняя автоматическая индукционная наплавка при оптимальных режимах (наклон первой ветви индуктора – 20-35°, второй – 10-20° к на-

плавляемой поверхности, скорость перемещения детали 3-3,5 мм/с с поочередным проходом обеих зон в автоматическом режиме, анодный ток 10 А, сеточный ток 2,5 А, анодное напряжение 10-12 кВ) длинномерных ножей ДЗ.118.10.001, выполненных из стали 15ХСНД твёрдым сплавом ПГ-С27.

### Библиографический список

1. Ткачёв В.Н. Индукционная наплавка / В.Н. Ткачёв, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А. Алдырев. – М.: Машиностроение, 1970.

2. Циммерман М.З. Рабочие органы почвообрабатывающих машин / М.З. Циммерман. – М.: Машиностроение, 1978.

3. Ишков А.В. Износостойкие боридные покрытия для рабочих органов сельхозтехники / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский, А.А. Максимов // Вестник АГАУ. – 2010. – № 9 (71). – С. 71-75.

4. Кривочуров Н.Т. Способы контроля тепловложения при индукционной наплавке / Н.Т. Кривочуров, В.В. Иванайский, Е.А. Иванайский, В.Я. Деризин // Вестник АГАУ. – 2007. – № 3 (29). – С. 61-62.

5. Иванайский В.В. Физико-химические и технологические основы управления структурой и свойствами защитного покрытия на рабочих органах сельхозмашин: монография / В.В. Иванайский. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2010.

6. Патент РФ № 1815078. Способ односторонней непрерывно-последовательной индукционной наплавки / А.А. Боль, О.А. Нагорных, А.Ю. Балаганский. МПК В23К 13/01. Заявл. 13.12.90. Опубл. 15.05.93 // Бюлл. № 18.



УДК 664.733

Е.Ю. Чикина,  
В.Л. Злочевский

## ЭНЕРГИЯ СЖАТИЯ ЗЕРНОВКИ ПРИ ПЛЮЩЕНИИ

**Ключевые слова:** деформация зерновки, площадь поперечного сечения, эллипсоид, направление сжатия, сжатие зерновки по толщине, энергия сжатия,

бороздка, прочность зерновки, маятниковая плющильная установка, раскрытие зерновки, зона плющения, максимальная энергоэффективность.