

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Развитие машиностроения требует решения ряда взаимосвязанных задач: упрочнения поверхности нагруженных деталей, повышения износостойкости и твердости волоочильного, режущего и штампового инструмента. Решение данных задач возможно осуществить перспективным технологическим приемом - внедрением в поверхность деталей атомов и ионов специально подобранных веществ методом ионной имплантации. В данной статье рассматривается конструкция и принцип действия установки ионной имплантации, подбор режимов обработки поверхности стальных изделий. Даны практические рекомендации по получению твердых и износостойких покрытий на инструменте.*

**Ключевые слова:** ионная имплантация, корпускулярное легирование, источник ионов, защитные покрытия.

### Постановка проблемы

Обычно защитные покрытия получают общеизвестными методами: вакуумным испарением, методом ионного распыления, вакуумным осаждением, реактивным распылением и другими методами. В последние годы все большее число ученых применяют вакуумные ионно-плазменные методы для получения упрочняющих твердых покрытий [1-2]. Методы упрочнения предусматривают создание потока частиц вещества и взаимодействие этого потока с поверхностью твердого тела. Результат этого взаимодействия проявляется в конденсации (нанесении, осаждении) вещества на поверхность, в насыщении (внедрении, легировании, имплантации) веществом поверхностного слоя. В основной своей массе методы упрочнения используют потоки частиц атомарного и молекулярного размеров, поэтому обычно говорят о методе ионного упрочнения (легирования) [3].

Сущность метода ионной имплантации состоит во внедрении легирующего элемента в кристаллическую решетку легируемого вещества. Для этого на поверхность твердого сплава направляют поток ионов легирующего элемента, ускоренных до энергии 5-40 кэВ, а также поток нейтральных частиц. В результате легирования получается новый упрочненный поверхностный слой, состоящий из легирующих веществ, с плавным изменением свойств по глубине.

### Цель(задачи) исследования

Целью исследования является обоснование структуры, принципов функционирования установки ионной имплантации поверхности стальных деталей и режимов их обработки.

### Результаты исследования

Эффект упрочнения при ионной имплантации инструментальных материалов достигается путем увеличения плотности дефектов за счет внедрения атомов легирующего элемента. Ионная бомбардировка инструментальной основы приводит к образованию дополнительного количества мелкодисперсных карбидных, нитридных и интерметаллических структур в связи с высокой химической активностью вспомогательных газов и легирующих элементов, проникающих в поверхностные слои инструментального материала в виде ионов.

Процесс ионной имплантации является низкотемпературным (473 К) и наиболее универсальным, т.к. позволяет легировать инструментальные материалы не только чистыми элементами, но и всевозможными их соединениями в различных газовых средах.

Данный метод сочетает в себе нанесение нейтралей на поверхность инструмента с радиационно-стимулированной диффузией примесей в глубину приповерхностного слоя. Основное влияние на свойства поверхности инструмента оказывает ионная имплантация, а возможность образования на поверхности инструмента покрытия из нейтралей позволяет изменить отдельные параметры покрытия в заданную сторону.

Данный способ относится к высокотехнологичным процессам и обладает рядом преимуществ:

- свойства поверхности могут изменяться в широких пределах без связи с объемными свойствами образца;
- после обработки поверхности возможно увеличение удельной поверхности;

– процесс в противоположность обычному легированию применим к самым разным материалам (металлам, керамике);

– нет поверхности раздела (как в случае покрытий), часто являющейся объектом коррозии или источником ухудшения механических свойств;

– при соответствующих режимах обработки наблюдается снижение шероховатости;

– вводится очень малое количество добавки, поэтому, при необходимости возможно использовать дорогие и редкие элементы без значительного повышения стоимости процесса;

– в имплантированной поверхности могут образовываться соединения, которые трудно, а в некоторых случаях невозможно получить другими способами;

– при этом могут образовываться соединения нестехиометрического состава с улучшенными каталитическими свойствами.

– поверхность после имплантации может повышать свою каталитическую активность.

При ионной имплантации любой элемент может быть внедрен в приповерхностную область мишени, помещенной в вакуумную камеру посредством пучка высокоскоростных ионов, имеющих энергию до нескольких мегаэлектронвольт. Ионы внедряются в материал на глубину от 0,01 до 1 мкм, теряя энергию в процессе столкновения с атомами основы. Распределение концентрации примеси по глубине для большинства комбинаций внедряемый атом-материал мишени может быть вычислен с помощью достаточно обоснованных теоретических предположений. Для малой дозы  $D$  ионов профиль концентрации примеси по глубине описывается гауссовским распределением с центром, расположенным по глубине среднего пробега. При высоких плотностях появляется сильное распыление и вызываемая ионным пучком миграция атомов, которые значительно изменяют или ограничивают максимальную глубину внедрения ионов и их концентрацию [4].

При длительных процессах внедряемые ионы передают значительное количество своей энергии атомам мишени, вызывая их перемещение. Существует вероятность, что атомы могут удаляться с поверхности мишени в результате столкновений, особенно при использовании тяжелых ионов. В этих условиях окончательное равновесие достигается равенством между количеством атомов, удаляемых распылением и количеством атомов, восполняемых корпускулярным легированием.

Распределение атомов имеет максимум у поверхности и падает с увеличением глубины.

При ионной имплантации изменяются физические свойства поверхности за счет всех заключенных в нем процессов: вакуумное напыление, химическое осаждение из пара, ионное нанесение покрытий, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения.

В результате ионной имплантации образуется поверхностный слой сплава с изменяющимся составом, который не обладает выраженной поверхностью раздела, характерной для осажденного слоя. При энергии имплантации 40 - 100 кэВ толщина имплантированного слоя обычно не превосходит 0,1 мкм.

За счет ионного нанесения можно получать достаточно толстый слой, состав которого не зависит от природы подложки. Энергия частиц при ионном покрытии не превышает 100 эВ при использовании для нанесения электрического поля в несколько киловольт. Кроме того, поверхности достигает порядка 10% ионов за счет атомных столкновений и рассеяния. Являются высокими энергетические потери при ионном нанесении. Покрытия наносятся только в "поле зрения".

Преимуществами ионной имплантации как метода модификации поверхности по сравнению с другими методами обработки поверхности являются:

- увеличение растворимости в твердом состоянии;
- независимость образования сплавов от констант диффузии;
- возможность быстрого изменения состава сплава;
- независимость от процессов, протекающих в объеме материала;
- возможность проведения процесса при низких температурах;
- весьма незначительное изменение размеров обрабатываемой детали;
- отсутствие проблемы адгезии, т.к. не существует ярко выраженной поверхности раздела;
- контролируемый профиль распределения концентрации по глубине и дозе;
- вакуумная чистота;
- высокая контролируемость и воспроизводимость.

Основным недостатком данного метода является обработка только той части поверхности, которая находится непосредственно в области действия ионного пучка. Невозможно обрабатывать образцы со сложными пересекающимися поверхностями. Ограничивает применение этого метода и неглубокое проникновение ионов, однако в отдельных условиях влияние внедренных ионов, проявляется на значительно большей глубине. Сдерживает применение метода относительно



Рис. 1 Внешний вид установки ИИ

дорогое оборудование и возрастание цены изделия после его обработки [5].

В литературе [6,7] широко освещаются возможности корпускулярного легирования и ионной имплантации для значительного повышения износостойкости, а также коррозионной стойкости материалов.

На рис 1 представлен внешний вид установки ионной имплантации.

Она состоит из вакуумной рабочей камеры, в которой установлен один или несколько источников ионов, управляемый блоком и обрабатываемый носитель или катализатор.

К камере подсоединены вакуумный насос, система охлаждения источника ионов и система подачи плазмообразующего газа.

Вакуумная камера представляет собой сварной вертикальный цилиндрический аппарат со съемной крышкой с внутренним диаметром 1135 мм и высотой 680 мм. Крышка крепится на корпусе с помощью откидных болтов. В крышке сварены два штуцера: один для источника ионов, а второй для смотрового стекла.

Вакуумная камера устанавливается на опорах. В ее корпусе сварены штуцеры: один диаметром 500 мм для подключения системы вакуумной

откачки и три диаметром по 400 мм для различных вариантов установки источников ионов и загрузки обрабатываемых деталей. В днище варен штуцер для подачи в камеру кабеля высокого напряжения.

Установка снабжена системой вакуумной откачки, которая содержит форвакуумный насос, высоковакуумный агрегат и высоковольтный выпрямитель. Вакуумпроводы соединяют форвакуумный насос с высоковакуумным агрегатом, переключаемым с помощью вентиля.

Блок управления установкой содержит схемы управления затвором высоковакуумного агрегата, электропитания плитки высоковакуумного агрегата и форвакуумного насоса и систему блокировки по напряжению. Измерение давления в вакуумной камере и насосе агрегата производится с помощью датчиков ПМТ-2 и ПМИ-2 вакууметром ВИТ-2. В вакуумной камере может располагаться несколько источников ионов: на крышке и на боковой поверхности.

На рис. 2 представлен чертеж установки ионной имплантации. Она состоит из вакуумной рабочей камеры 1, в которой установлен один или несколько источников ионов 2. Вакуум создается и поддерживается форвакуумным насосом 3 и

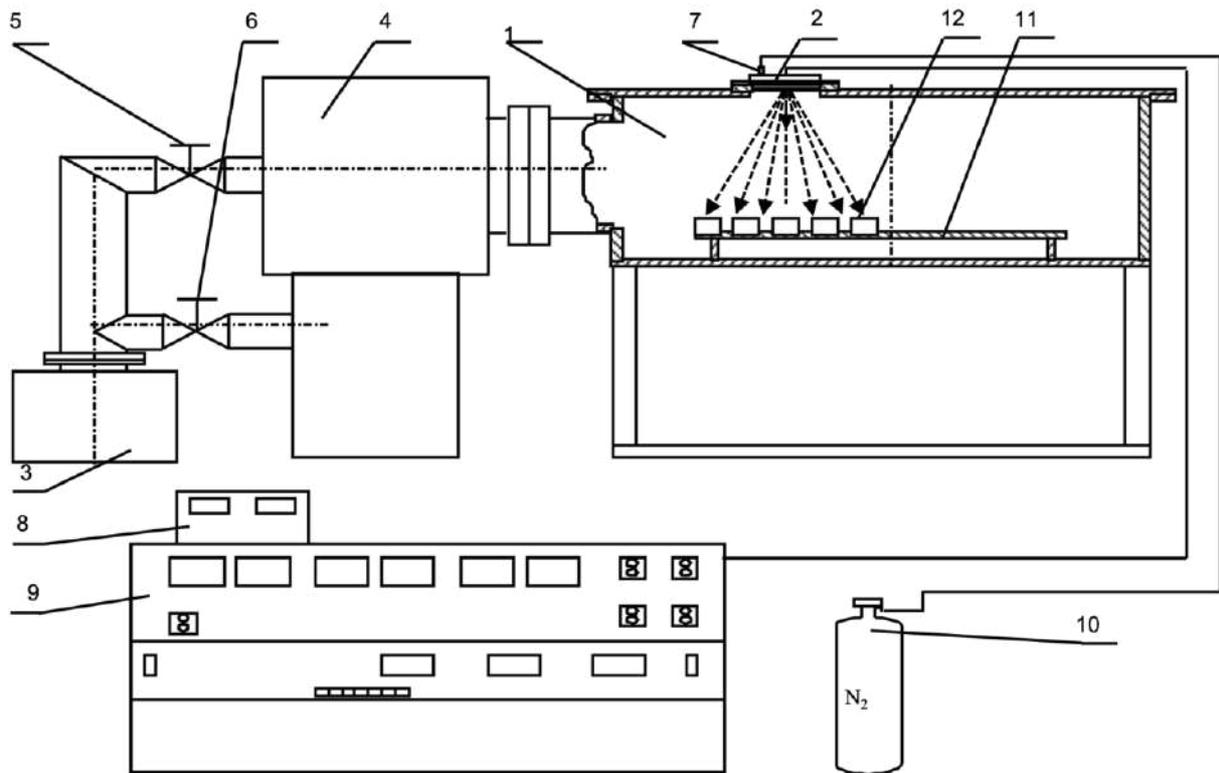


Рис. 2 Схема установки ИИ

высоковакуумным агрегатом 4, которые соединены с вакуумной камерой через вентили 5 и 6. Рабочий газ поступает через натекатель 7 из баллона 10. Уровень вакуума измеряется вакуумметром 8, поддержание рабочих параметров установки выполняется с помощью блока питания и управления 9, на столе 11 размещаются обрабатываемые детали 12.

В основу работы источника ионов положен принцип электрического разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях в парах легирующего элемента и плазмообразующего газа. Заменяя в источнике ионов мишень (центральную сменную часть), получают ионы необходимого легирующего элемента. Для внедрения вещества покрытий используется катодное распыление мишени источника ионами рабочего газа, которым может служить азот, кислород, аргон подаваемые в вакуумную камеру через натекатель. В последних случаях внедренные покрытия содержат соединения нитридов и оксидов, соответственно.

Для реализации высокой производительности нанесения покрытий используется катодное распыление мишени источника ионами вспомогательного газа, которым чаще всего служит азот, с целью получения на поверхности нитридов рабочего элемента.

Конструкция источника ионов, приведенная на рис. 3 и на рис. 4, поясняется приведенной ее спецификацией. Источник ионов состоит из трех

электродов: 1 – анода; 2 – магнита; 3 – мишени; 4 – катода. Источник ионов расположен над столом с обрабатываемыми деталями 5.

Электроды служат анодом и катодом вспомогательного разрядного промежутка. Мишень армирована со стороны разрядного промежутка насадкой из легирующего материала. Анод и мишень имеют водяное охлаждение. Катушки, расположенные в обоймах, создают магнитное поле, продольное оси источника ионов. В разрядный промежуток вводится газовое питание через штуцер, не показанный на рисунке. Конструкция источника ионов имеет прямоугольную форму для обеспечения корпускулярного потока такой же формы.

При подаче напряжения на электроды вспомогательного разрядного промежутка между ними зажигается аномальный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях в среде вспомогательного газа (азот, аргон).

На мишень подается отрицательное напряжение до 10 кВ относительно катодов, при этом положительные ионы вспомогательного газа выходят из щели между катодом и бомбардируют мишень. Нейтрали легирующего материала, выбитые из мишени, попадают в разрядный промежуток, образованный мишенью, внутренней цилиндрической поверхностью катодов и держателем режущего инструмента, расположенным в рабочей камере, и ионизируются. За катод в сторону, противоположную мишени, выходит поток ионов



Рис. 3. Внешний вид ионного источника

и нейтралей вспомогательного газа и легирующего материала, при этом ионы ускоряются на держатель инструмента отрицательным напряжением до 40 кВ, приложенным на держатель относительно заземленных катодов.

Источник ионов на основе самостоятельного контрагированного разряда с замкнутым дрейфом электронов обеспечивает пучки круглого поперечного сечения диаметром 0,1 м. Источники ионов на основе самостоятельного двухкаскадного плазменно-пучкового разряда обеспечивают пучки плоского поперечного сечения требуемой формы площадью до 100 см<sup>2</sup>. Источники ионов на основе самостоятельного дугового контрагированного разряда с многоапертурной системой извлечения предназначены для получения пучков круглого или прямоугольного сечения в непрерывном режиме с током (0,1-0,6) А при ускоряющем напряжении (0,5-6) кВ, токе разряда (2-6) А, напряжении разряда (50-100) В, расходе газа (1,2-2)А в пересчете на однократную ионизацию всех поступающих в разряд атомов.

Площадь поперечного сечения пучка составляет до 300 см<sup>2</sup> с неравномерностью плотности тока 10% в случае использования плоских электродов системы извлечения. Сферическая форма электродов позволяет в несколько раз уменьшить или увеличить площадь поперечного сечения пучка.

Порядок работы на установке следующий. В вакуумную камеру через загрузочный люк в емкость помещают обрабатываемую деталь (носитель или катализатор). Закрывают загрузочный люк и проверяют положение всех вентилях, которые должны быть закрыты. Затем включается водяное охлаждение форвакуумного насоса и

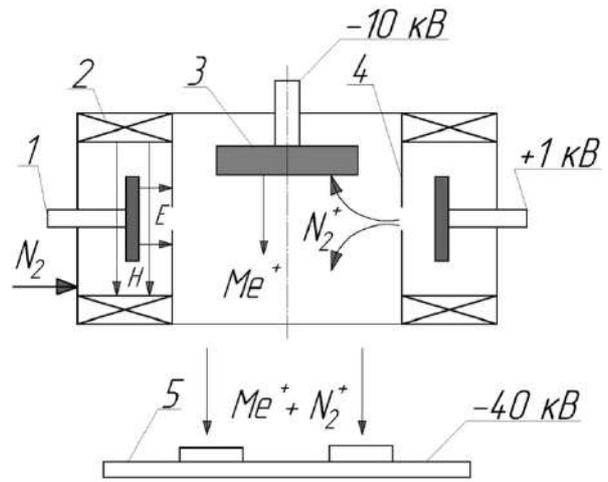


Рис. 4 Схема ионного источника

сам насос. Открывается на форвакуумном насосе масляный вентиль и вентиль предварительной откачки. После получения вакуума в верхней части высоковакуумного агрегата в вакуумную камеру открывается вентиль основной откачки, через который откачивается объем высоковакуумного агрегата. Включается электроплитка (подогреватель) высоковакуумного агрегата и его водяное охлаждение. После достижения в насосе агрегата остаточного давления порядка 0,143 Па закрывается вентиль предварительной откачки и открывается затвор высоковакуумного агрегата и производится откачка вакуумной камеры. После достижения остаточного давления порядка 0,013...0,0013 Па вакуумную камеру промывают через натекаль рабочим газом несколько раз, изменяя остаточное давление в камере от 0,13 Па до 0,0013 Па. Затем устанавливается остаточное давление 0,013 Па, включается общее электропитание на выпрямителе, водяное охлаждение и высоковольтный выпрямитель.

Увеличением напряжения зажигается разряд между анодом и катодом и повышают напряжение мишени до 7...9 кВ. Выводится на заданную величину напряжение с помощью выпрямителя. Производится коррекция напряжений и остаточного давления в камере и производится обработка поверхности носителя.

После набора заданной дозы легирования выключение установки производится в обратном порядке.

Набираемая при этом доза легирования, т. е. количество ионов каталитического компонента, попавших на 1 см<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{I \cdot t}{S \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} [1 / \text{см}^2],$$

где,  $t$  – время легирования, с;  $I$  – ток между источником ионов и поверхностью поршней,  $S$  – площадь легируемой поверхности,  $\text{см}^2$ ;  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – элементарный заряд.

Для разработанной установки при  $S=10 \cdot 30 \text{ см}^2$ ;  $I=2 \text{ мА}$ , часовая доза составляет  $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Плотность тока на пластинах составляет –  $7 \text{ мкА/см}^2$ .

Масса вещества, попадаемая на  $1 \text{ см}^2$  поверхности, обрабатываемой ионным пучком, рассчитывается по формуле:

$$M = D \cdot N \cdot A, \text{ кг/см}^2$$

где,  $D$  – доза легирования,  $\text{см}^{-2}$ ;  $N$  –  $1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – атомная единица массы;  $A$  – атомная масса элемента.

Замена одного из узлов источника позволяет получать смешанные пучки ионов газа и металла с содержанием до 60% ионов металла (W, Fe, Cu и др.). Изменение полярности ускоряющего напряжения приводит к формированию электронного пучка с током до 6 А.

Преимущество метода ионной имплантации по сравнению с другими методами состоит в том, что на имеющихся в промышленности установках "Булат" упрочняющие покрытия наносятся при температуре инструмента  $350 \dots 800^\circ\text{C}$  путем термодиффузии из плазмы дугового разряда в вакууме в горячий инструмент (так называемый метод конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ)). Мелкий и тонкий инструмент при таких температурах трудно предохранить от неравномерного нагрева, который приводит к его короблению. Быстрорежущий инструмент при указанных температурах теряет результаты предыдущей термообработки (разупрочняется). Крупногабаритный инструмент либо невозможно поместить в рабочую камеру установок типа "Булат", либо не удается нагреть до температуры, необходимой для термодиффузии.

Установки ионной имплантации дополняют метод КИБ возможностями упрочнения тонкого, мелкого и крупногабаритного инструмента при низких температурах (порядка  $100^\circ\text{C}$ ), причем с образованием адгезионной связи покрытия с основой инструмента и самых различных инструментальных материалов.

При использовании метода ионной имплантации на поверхности стальных изделий формируются твердые, износостойкие, коррозионностойкие покрытия, которые защищают мелкогабаритный инструмент от износа, делают его долговечным при эксплуатации. Нанесение защитных покрытий производилось на изделия из конструкционных и инструментальных сталей, пригодных

для изготовления штампов для холодной штамповки, небольших прокатных валков, фильер для волочильных машин, дисков и фрез для ткацких станков [8...9]. После обработки фрез, сверл, фильер, режущего инструмента методом ионной имплантации повышается твердость поверхности в 2–3 раза, энергия адгезии повышается в 3 раза по сравнению с другими методами, износостойкость возрастает до 12 раз [10]. Данный метод рекомендуется применять в машиностроении в качестве нанесения защитных покрытий на различные виды инструмента.

## Выводы

При применении метода ионной имплантации на поверхности мелкогабаритного волочильного, прокатного, штампового инструмента формируются защитные покрытия, что делает данный метод перспективным в машиностроительной отрасли для повышения, твердости, износостойкости и коррозионной стойкости деталей машин и механизмов.

## Список литературы

1. Hirvonen, J. K. ed. Ion Implantation. New York: Academic Press, – 1980.
2. J. M. Poate, G. Foti, D. C. Jacobson. Surface Modification and Alloying Published in cooperation with NATO Scientific Affairs Division. New York and London: Plenum Press, – 1983.
3. Ионно-лучевая модификация материалов // Тезисы докл. Всесоюз. Конф. – Черногоровка. – 1987. – 91 с.
4. В. Г. Абдрашитов, В. В. Рыжов. Оптимальные режимы активации поверхности методом ионной имплантации // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1989. – №7. – С. 148-149.
5. Н. А. Василенко, В. В. Гончаров. Ионная имплантация как один из перспективных способов получения нанокатализаторов с заданными физико-химическими свойствами. – Organization of scientific research in modern conditions '2020: conference proceedings. – Seattle: KindleDP, 2020 с. 62-66
6. Научно-технический прогресс в машиностроении. Вып.9. Современные методы упрочнения поверхностей деталей машин: Аналитический обзор/ Инс-т машиностроения им. А.А. Благонравова АН СССР. – М.: МЦНТИ. – 1989. – 286 с.
7. Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. Тез. Докладов секции I «Источники пучков заряженных частиц для модификации конструкционных материалов». – Томск: ТПИ. – 1988. – 194 с.

8. Н. А. Василенко, В. В. Гончаров, А. А. Кли- маш Поверхностное упрочнение деталей транспортных машин и механизмов с помощью высокодозной имплантации. – Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, №4 (234). – 2017 – с. 65-69.
9. Н. А. Василенко, В. В. Гончаров, А. А. Кли- маш. Улучшение механических характери- стик деталей цилиндропоршневой группы с помощью ионной имплантации. Вісник Східноукраїнського національного універси- тету імені Володимира Даля, №3 (251). 2019. с. 54-57
10. Н. А. Василенко Упрочняющие покрытия на конструкционных сталях. – Материалы Между- народной научно-практической конферен- ции «Ценностные приоритеты образования в XXI веке: инновационные процессы в про- фессиональном образовании». – г. Луганск, 2022.- с. 131-138

**N.A. Vasilenko /Cand. Sci. (Eng.)/**

*Branch of the "Starobilsk Faculty" of Luhansk State Pedagogical University (Starobilsk)*

### **THE POSSIBILITIES OF USING ION IMPLANTATION IN MECHANICAL ENGINEERING**

**Annotation.** *The development of mechanical engineering requires solving a number of interrelated tasks: hardening the surface of loaded parts, increasing the wear resistance and hardness of drawing, cutting and stamping tools. The solution of these problems can be carried out by a promising technological technique - the introduction of atoms and ions of specially selected substances into the surface of the parts by the method of ion implantation. This article discusses the design and operating principle of the ion implantation unit, the selection of surface treatment modes for steel products. Practical recommendations for obtaining hard and wear-resistant coatings on the tool are given.*

**Background.** *It is well known that protective coatings are obtained by various methods: vacuum evaporation, ion sputtering, etc. For hardening a small tool, the most effective method is ion implantation, the essence of which is the introduction of an alloying element into the crystal lattice of the alloyed substance. As a result of such alloying, a new hardened surface layer is obtained, consisting of alloying substances, with a smooth change in properties with depth.*

**Materials and/or methods.** *The purpose of the study is to substantiate the structure, principles of operation of the installation for ion implantation of the surface of steel parts and their processing modes. A technique for obtaining protective coatings in low-temperature plasma is proposed. The doping dose was calculated.*

**Results.** *The advantages of this method, in comparison with other methods for obtaining protective coatings, are indicated. When using the ion implantation method, hard, wear-resistant, corrosion-resistant coatings are formed on the surface of steel products, which protect small-sized tools from wear and make them durable in operation.*

**Conclusion.** *When using the ion implantation method, protective coatings are formed on the surface of small-sized drawing, rolling, and stamping tools, which makes this method promising in the engineering industry for increasing the hardness, wear resistance and corrosion resistance of machine parts and mechanisms.*

**Keywords:** *ion implantation, corpuscular doping, ion source, protective coatings.*

**Сведения об авторе**

**Н.А. Василенко**

SPIN-код: 7500-4137

ORCID iD: 0000-0001-5705-1018

Телефон: +7 (959) 517-95-13

Эл. почта: Natalia-Vasilenko.73@yandex.com

*Статья поступила 15.04.2022 г.*

*© Н.А. Василенко, 2022*

*Рецензент д.т.н., проф. А.Н. Михайлов*