

**В.А. Сошко, к.т.н., доц.
М.И. Подольский, к.т.н., доц.
Д.Д. Федорчук, студ., магистр**

Харьковский национальный технический университет

Влияние плазменного эффекта на диффузионное насыщение контактирующих поверхностей в зоне стружкообразования

На основании совокупности экспериментальных данных предложена модель механизма превращения в зоне резания поверхностно-активной МОТЗ в радиально активную. Выявлены закономерности зависимости обрабатываемости от совокупности действия механических факторов и тепловой энергии, которая образуется в результате рекомбинации ионизированного водорода в области перестройки и разрыва сил связей. Показано, что эффективность, что образовалась в радиально активной среде, связана взаимодействиями положительно заряженных электрических частей водорода с новой электрически активной реальной структурой, которая возникает в результате механического действия на металл.

Анализ исследований в смежных областях науки показывает, что скоростной (импульсный) нагрев стали является эффективным способом влияния на структурное состояние металла. Например, при скоростном нагреве стали аустенит формируется в чрезвычайно короткие промежутки времени, невзирая на его диффузионную природу образования. В связи с этим предусматривалось, что в зоне формообразования стружки, которая образуется в результате взаимодействия протонов с реальной структурой контактирующих поверхностей заготовки с инструментом, импульсная тепловая энергия так же может вызывать структурные изменения металлов и диффузионную подвижность химических элементов пирополимерного остатка, в частности, углерода. Истинная специфика нагрева при тепловой вспышке, по-видимому, заключается в том, что тепловая энергия, необходимая для разных фазовых и структурных изменений сталей, создается непосредственно в реагирующем объеме, а не поступает к нему из периферийных областей за счет теплопроводности, как это происходит при внешнем нагреве. В связи с изложенным проводились исследования влияния специфических условий, какие создаются в зоне контакта клина инструмента с заготовкой, которые образуются в связи с химической активацией МОТЗ.

Однако полученные результаты позволяют сделать вывод, что многократное повышение износостойкости инструмента при МПО является следствием нескольких факторов: снижение сил резания, уменьшение коэффициента трения поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом и заполнением резательными кромками инструмента потери углерода. Это значит, что использование полимеров как присадки к МОТЗ, которые обеспечивают проявление плазменного эффекта в зоне разрушения, можно рассматривать также, как одно из направлений возможности создания водородной технологии химико-термической обработки конструкционных сталей, с целью приобретения оптимальных физико-механических свойств.

Ключевые слова: *механо-плазменная обработка; смазочно-охлаждающие технологические средства; резание; углерод; диффузия.*

Постановка задачи. Известен способ механоплазменной обработки (МПО), который осуществляется при обработке металла резанием в среде смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), когда в составе технологической среды содержится полимер, например, полиэтилен или полихлорвинил в концентрации 1,5 % [1].

При МПО в результате пиролиза полимерной составляющей СОТС образуются две фазы – газообразная, состоящая из водорода в различных формах и углеродных соединений (если присадкой к СОТС служит полиэтилен (ПЭ), а также твердая фаза, представляющая собой углерод.

Были рассмотрены этапы дальнейших химических превращений образовавшейся среды вплоть до водородной плазмы, ее влияния на процессы деформации и разрушения при резании металла. В данном разделе приводятся результаты исследования роли второй фазы – пирополимерного остатка, а точнее составляющих его химических элементов на интенсивность износа инструмента – основного показателя обрабатываемости. В этих исследованиях учитывается также возможное влияние образовавшихся продуктов распада полимера на насыщение ими поверхности обрабатываемой детали, что, как предполагалось, может дать возможность регулирования поверхностных свойств изделий, а значит, и их эксплуатационную долговечность.

Анализ предыдущих исследований. Анализ исследований в смежных областях науки показывает, что скоростной (импульсный) нагрев стали является эффективным способом воздействия на структурные состояния металла [2, 7]. Например, при скоростном нагреве стали аустенит формируется в чрезвычайно короткие промежутки времени, несмотря на его диффузионную природу образования. В связи с этим полагалось, что при резании, в зоне образования стружки, образующейся вследствие взаимодействия протонов с реальной структурой контактирующих поверхностей заготовки с инструментом, импульсная тепловая энергия, так же должна вызывать серьезные структурные изменения металлов и диффузионную подвижность химических элементов пирополимерного остатка, в частности, углерода. Истинная специфика нагрева при тепловой вспышке, по-видимому, состоит в том, что тепловая энергия необходимая для различных фазовых и структурных изменений сталей создается непосредственно в реагирующем объеме, а не поступает к нему из периферийных областей за счет теплопроводности, как это происходит при внешнем нагреве.

В связи с изложенным проводились исследования влияния специфических условий, которые создаются в зоне контакта клина инструмента с заготовкой, создающиеся в связи с химической активацией СОТС.

Исследование процесса образования твердого остатка при пиролизе полимерной составляющей СОТС проводили на спектрометре ЭПР, а также путем электрофизических измерений.

Пробу твердого остатка, который накапливался на инструменте в процессе резания, собирали в кварцевую ампулу и помещали в резонатор спектрометра ЭПА-2А. В качестве эталона интенсивности сигнала ЭПР использовался дифенилпикрилгидразил (ДФПГ), а эталона напряженности магнитного поля – MgO.

Для исследований диэлектрических и электрофизических свойств твердого остатка использовали спектральную ячейку, в которую помещали пирополимер. Измерения проводили в температурно-временном диапазоне 25–250 С, через каждые 5 С с выдержкой при каждом значении температуры.

Определение процентного содержания радикалов в общем количестве парамагнитных центров материала проводили по следующей методике: готовили 0,2 % вес. раствор ДФПГ в бензоле и определяли интенсивность сигнала раствора ДФПГ, объемом 0,1 мл. Навеску пиролизированного полимера помещали в емкость с раствором ДФПГ, а затем измеряли интенсивность сигнала ЭПР данного объема раствора с полимерным остатком. По разности интенсивности сигналов определяли процентное содержание свободных радикалов в общем числе парамагнитных центров.

Полученный сигнал для полимерной присадки из ПЭ представлял собой синглет, который соответствовал сигналу ПЭ после радиационного облучения. Этот сигнал относят к сопряженной системе вида – $\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{C}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$, его относят к стабильным радикалам, которые могут сохраняться в матрице пиролизата в положениях, в которых существуют стеретические препятствия для их рекомбинации [3, 8, 9]. Следует отметить, что сигнал такого вида часто фиксируется в пиролизированных полимерах, образующих полисопряженную, полициклическую систему, состоящую из графитизированных ароматических колец. Действительно, изучение этого процесса, показало, что образующаяся вследствие пиролиза полимерная присадка к СОТС представляет собой аморфизированный графит. Здесь же отметим, что согласно данным, такой органический пиролизат обладает специфическими электрофизическими и магнитными свойствами. Известно, что в слоистой решетке графита атомы углерода образуют плоскую, двухмерную шестиугольную сетку, с расстояниями С–С 1,42 Å, тогда как плоскости отстоят на 3,42 Å и соединены лишь весьма слабыми силами Ван-дер-Вальса. Именно поэтому отдельные слои графита легко расщепляются на тонкие чешуйки, представляя собой, благодаря этому свойству, эффективное смазочное средство. Видимо при резании, образующаяся графитизированная система в зоне резания, способна не только насыщать лезвие инструмента, обработанную поверхность заготовки и стружку, но и эффективно разделять трущиеся поверхности, снижая коэффициент трения [10].

На рисунке 1 представлены данные о зависимости кинетики возникающих парамагнитных центров и свободных радикалов при пиролизе присадки полиэтилена в СОТС от времени механоплазменной обработки.

Из представленных данных видно, что действительно при процессе резания вследствие пиролиза полимерной присадки (в данном случае ПЭ) образуется органическое вещество, обладающее радикально активными свойствами, способствующее не только ускорению диффузионных процессов в контактирующих металлических поверхностях, но и катализировать химические реакции превращения активируемой окружающей среды.

Установлена также зависимость увеличения концентрации ПМЦ и свободных радикалов в пирополимере, которая имеет экстремальный характер от времени механической обработки. При этом с увеличением времени обработки максимум концентрации парамагнитных центров сужается и сдвигается в область меньших времен обработки, то есть наблюдается определенная температурно-временная

аналогия данного процесса. С дальнейшим увеличением времени обработки в пирополимере начинает превалировать спад ПМЦ [4].

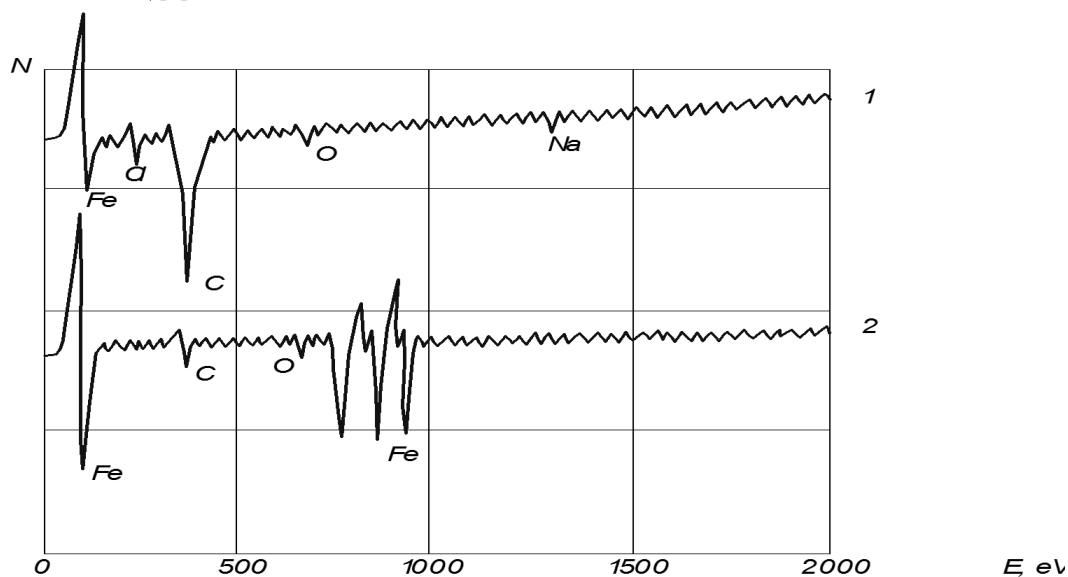


Рис. 1. ОЖЕ-спектры, снятые со стали 45 после продольного точения в полимерсодержащей СОТС: 1 – на поверхности; 2 – на глубине 18–22 нм.

По результатам замера электросопротивления пиролизированного полимера от времени обработки определялась ширина запрещенной зоны проводимости полимерного пиролиза, что является важным критерием каталитических свойств. Было показано [4], что максимум ширины запрещенной зоны электропроводности и максимум суммарной концентрации ПМЦ совпадают в одной временной области. Тот факт, что две характеристики вещества, электрофизическая и магнитная, которые связаны с каталитической активностью данного вещества, совпадают в одной области, позволяет полагать, что в такой области полимерный остаток обладает максимальной каталитической активностью, следовательно, все процессы, связанные с глубиной превращений полимерной компоненты СОТС после ее термодеструкции, продолжают на каталитически активных продуктах пирополимера.

Таким образом, состоящая из углеродных атомов полимерная цепь, вследствие пиролиза образует не только газовую фазу, состоящую из водорода в активных формах, простейших органических соединений и фрагментов макроцепи, но и полисопряженную полициклическую систему, состоящую из графитизированных ароматических колец. Причем образовавшаяся активная система одновременно выполняет несколько функций: углубляет химические превращения газовой смеси, разделяет трущиеся поверхности и является карбюризатором для насыщения режущих кромок инструмента и обработанной поверхности заготовки.

Методом сканирующей ОЖЕ-спектроскопии изучался химический состав поверхностного слоя стали после точения в полимерсодержащей СОТС. Установлено (рис. 1), что на поверхности обработанного материала наблюдается большая концентрация углерода и, в то же время, практически отсутствуют сигналы О и Fe. Таким образом, установлен факт термодиффузионного насыщения в процессе резания стальной поверхности углеродом.

Вообще говоря, полученные данные о насыщении углеродом стальной поверхности на достаточно большую глубину в экстремальных условиях резания, вызывают удивление. Известно, что переход атомов углерода с заметной скоростью в объем требует преодоления высокого активационного барьера. В условиях резания – температура в момент отделения стружки от заготовки и концентрация углерода на поверхности слишком мала, а скорость прохождения металла зоны вероятного насыщения слишком высока, чтобы углерод успел проникнуть в поверхностный слой металла на достаточную глубину. Остается допустить, что высокая скорость переноса углерода в приповерхностные слои металла в момент пластической деформации может быть связана с очень сильным мгновенным «разогревом» тех степеней свободы в кристаллической решетке, которые более всего ответственны за перенос углерода. Следовательно, транспорт углерода внутрь металла при его пластическом деформировании в процессе резания не может быть описан в рамках равновесной термодинамики диффузионного процесса и требует иных теоретических подходов.

Скорее всего, механизм ускоренного насыщения обработанной стали углеродом аналогичен ранее описанному группой ученых в известной монографии [5]. В эксперименте использовалась разработанная специальная аппаратура, которая позволяла одновременно регистрировать изменение нескольких

параметров, то есть, получать широкую информацию протекающего процесса при высокой надежности эксперимента. В результате исследования фазовых структурных изменений сталей при скоростном нагреве были получены неожиданные результаты. Оказалось, что при прямом нагреве электрическим током аустенизация происходит намного быстрее, чем при тех же температурах в печах или ваннах. Было показано, что специфика ускоренной аустенизации состоит в том, что тепловая энергия, необходимая для реакции, создается непосредственно в реагирующем объеме, а не поступает к нему из периферийных областей за счет теплопроводности.

При резании стали в СОТС, образующиеся в зоне разрушения положительно заряженные частицы водорода в результате их рекомбинации на поверхности и прилежащих слоях материала, выделяют большую тепловую энергию. Создаваемая непосредственно в реагирующем слое тепловая энергия вызывает фазовые и структурные превращения, а так же ускоренную диффузию углерода. Отсюда следует важный практический вывод: в случае формирования равномерного слоя насыщения на достаточную глубину, заключительный этап механической обработки возможно совмещать с различными технологиями, позволяющими путём специальной операции (например МПО) осуществлять термомодифицированное насыщение (ТФН) поверхностного слоя изделий с целью повышения их различных физико-механических свойств. Таким образом, появляется новый способ воздействия на структурное состояние приповерхностных слоев стали в процессе МПО [6].

Активирующее влияние водорода исследовалось на примере цементации стали Св-0.8Г2С, что, как нам представляется, в определенной степени позволяет моделировать процесс насыщения, происходящий в условиях МПО.

В качестве насыщающих сред были выбраны порошки полиэтилена низкого давления 21008-75, содержащего углерод и водород, а также дисперсный углерод. Насыщение образцов осуществлялось по одному температурно-временному режиму: температура 950 С, время насыщения 30 и 60 секунд, с последующей закалкой в воде.

Установлено, что насыщающая способность ПЭ значительно выше по сравнению с дисперсным углеродом (рис. 2). Как уже отмечалось, причиной этого может быть импульсивная тепловая вспышка вследствие рекомбинации протона. Механизм этого явления может быть описан в связи с протеканием следующих физико-химических процессов. Известно, что возникновение тепловой энергии непосредственно в области разрушения материала увеличивает тепловые колебания атомов, в результате которой отдельные атомы приобретают энергию, достаточную для того, чтобы покинуть свое равновесное положение в решётке и образовать вакансию, а затем их комплексы и даже поры наномасштабного размера. Образовавшиеся дефекты могут рассматриваться как центры захвата диффузионных атомов углерода, что приведет к его накоплению. Благодаря этим процессам в целом значительно ускоряется гетерогенная диффузия углерода. Активирующее влияние водорода на диффузию углерода может быть связано также с разблокировкой дислокаций, что повышает их подвижность, а также за счет восстановления окислов на поверхности стали.

Полученные результаты имеют практическое значение, ибо использование полимеров заданных физико-химических свойств в качестве эффективной присадки к СОТС позволяет параллельно с механической обработкой осуществить процесс повышения эксплуатационной долговечности изделий. Кроме этого, активирующее влияние водорода, образующегося вследствие пиролиза полимера, на процессы диффузии можно рассматривать как одно из направлений создания водородной нанотехнологии химико-термической обработки металлов с целью получения оптимальных физико-механических свойств при значительном ускорении технологического процесса и одновременным повышением его экономических показателей.

Таким образом, образующийся в процессе МПО в зоне резания пирополимер, обладающий специфическими свойствами, является превосходным карбюризатором для диффузионного насыщения стали химическими элементами, атомы которых либо находятся в составе макроцепи полимера, либо предварительно специально вводятся в его состав. В данном случае речь идет о полисопряженной полициклической системе, состоящей только из графитизированных ароматических колец, поскольку в качестве добавки к СОТС применялся ПЭ. Насыщающая способность пироостатка определялась косвенно, путем сравнения с концентрацией в системе радикальноактивных парамагнитных центров, максимальная активность которых находится уже на начальном этапе работы инструмента (рис. 2). При этом, скорость и концентрация образования активных насыщающих продуктов и активных форм водорода увеличивается с увеличением параметров механической обработки.

Как уже отмечалось, рекомбинация протона водорода в металле приводит к выделению большой тепловой энергии. Быстрый нагрев и отвод тепла из высоконагретой области способствует протеканию структурных превращений типа закалки и отпуска, что создает благоприятные условия для ускоренной диффузии углерода. Кроме того, откладываясь в процессе резания на режущих кромках, углерод, постепенно растворяется в металле, отдавая в общий фонд кристалла два электрона. Это означает, что углерод, находясь в аустените в виде дважды ионизированного иона, будет реагировать на однократно

ионизированный атом железа, обуславливая тем самым его диффузионную подвижность. В процессе ускорения диффузии углерода в инструмент важную роль играет Т.Э.Д.С., присутствующая в системе «станок–инструмент–заготовка».

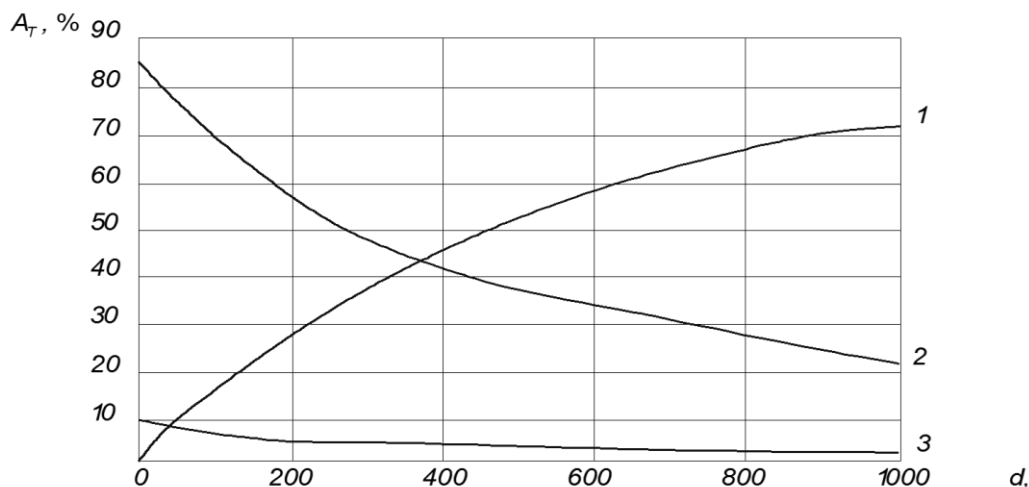


Рис. 2. Распределение химических элементов в поверхностном слое стали 45 (HRC 28...32) после продольного точения в полимерсодержащей СОТС:

1 – железо; 2 – углерод; 3 – кислород.

Наличие внешнего электрического поля значительно катализирует скорость перемещения активированного углерода в металле. Следовательно, в зоне контакта режущих кромок инструмента с заготовкой и стружкой создаются благоприятные условия для ускоренной диффузии углерода. Важно отметить, что насыщению чистых ювенильных поверхностей будут также способствовать градиент температуры и высокое давление в зоне контакта. Окончательно формирует свойства инструментальной стали и в первую очередь высокую износостойкость инструмента последующая закалка, при которой получается высокоуглеродистый мартенсит. По-видимому, после импульсного подъема температуры локальные структурные изменения в микрообъемах материала могут быть связаны с резким спадом температуры вследствие высокой скорости охлаждения. Высокая износостойкость режущего инструмента подтверждается как экспериментальными, так и результатами внедрения МПО [3].

В связи с установлением факта насыщения стали углеродом, проводился анализ поверхностного слоя режущих лезвий инструмента после его длительной работы в различных технологических средах и после МПО. Исследованию подвергались резцы, сверла и фрезы. Распределение углерода по глубине диффузионного слоя исследовалось на микроанализаторе «Сомеса» сканированием по поверхности нетравленого шлифа. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении общего содержания углерода в поверхностном слое режущего инструмента после МПО. При этом глубина диффузионного слоя зависит от режимов механической обработки и продолжительности работы инструмента. Например, при сверлении в течение 30 секунд стали-45 в состоянии поставки сверлом Ø 10 мм из быстрорежущей стали Р6М5 в СОТС с 1,5 % ПЭ обеспечивалось насыщение углеродом на глубину 20 мкм и увеличение микротвёрдости поверхностного слоя с 95 ГПа до 115 ГПа. Наличие упроченного слоя подтверждается также образованием на микроструктуре характерных для цементации светлых диффузионных слоев. Ещё один пример: после длительной работы сверло из стали Р6М5 было отбраковано вследствие износа. Микротвёрдость его поверхностного слоя находилась на уровне примерно 9,3–9,5 ГПа. Затем это же сверло применялось для работы в тех же условиях, но с СОТС с добавкой 1,5 % ПЭ. Примерно через 90 секунд непрерывной работы поверхностная твердость возросла до 11,5 ГПа и дальнейшая обработка проходила в штатном режиме. Исходя из этих результатов, проводилось восстановление 10 штук отбракованных сверл путем их «тренировок» в полимерсодержащей СОТС. В результате режущие свойства сверл были восстановлены.

Таким образом, частичное обезуглероживание поверхностных слоев инструмента в процессе резания, в полимерсодержащей СОТС восполняется углеродом из образующегося в зоне резания активного карбюратора, обладающего каталитическими свойствами.

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что многократное повышение износостойкости инструмента при МПО, является следствием нескольких факторов: снижения сил резания, уменьшения коэффициента трения поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом и восполнением режущими кромками инструмента потери углерода. Это означает, что использование полимеров в качестве присадки к СОТС, обеспечивающих проявление плазменного эффекта в зоне разрушения, можно рассматривать также как одно из направлений возможности создания водородной

технологии химико-термической обработки конструкционных сталей с целью получения оптимальных физико-механических свойств.

Список использованной литературы:

1. Сошко В.А. Механохимическая обработка металлов / В.А. Сошко, А.И. Сошко. – ФРГ : LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 98 с.
2. Физические основы электротермического упрочнения стали / В.Н. Гриднев, Ю.Я. Мешков, С.П. Ошкадеров, В.И. Трефилов. – К. : Наук.думка, 1973.
3. Sawton E.J. // Chemical physics. – 1960. – No. 33. – 395 с.
4. Сошко А.И. Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла. Т. 1 / А.И. Сошко, В.А. Сошко. – Херсон : Олди-плюс, 2008. – 388 с.
5. Сошко А.И. Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла. Т. 2 / А.И. Сошко, В.А. Сошко. – Херсон : Олди-плюс, 2008. – 230 с.
6. Сошко А.И. Обоснование механоплазменного эффекта, возникающего в процессе механической обработки металла в смазочно-охлаждающих технологических средствах / В.А. Сошко, А.И. Сошко // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – С. 117–140.
7. Сероштан Т.П. Исследование особенностей термодиффузионного насыщения сталей из полимерсодержащих технологических сред : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.16.01 / Т.П. Сероштан. – 1980. – 175 с.
8. Тугов И.И. Химия и физика полимеров / И.И. Тугов, Г.И. Костыркин. – М. : Химия, 1989.
9. Кулезнев В.И. Химия и физика полимеров / В.И. Кулезнев, В.А. Шершнев. – М. : Высшая школа, 1988.
10. Фордзюк Ю.И. Комплексное диффузное насыщение сталей углеродом, азотом, серой, фосфором из полимерсодержащих составов : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.01 / Ю.И. Фордзюк. – 1989. – 146 с.

References:

1. Soshko, V.A. (2015), *Mehanohimicheskaja obrabotka metallov*, LAMBERT Academic Publishing, FRG, 98 p.
2. Gridnev, V.N., Meshkov, Ju.Ja., Oshkaderov, S.P. and Trefilov, V.I. (1973), *Fizicheskie osnovy jelektrotermicheskogo uprochnenija stali*, Nauk. dumka, Kiev.
3. Sawton, E.J. (1960), «Chemical physics», *Chemical physics*, No. 33, 395 p.
4. Soshko, A.I. and Soshko, V.A. (2008), *Smazochno-ohlazhdajushhie sredstva v mehanicheskoj obrabotke metalla*, Vol. 1, Oldi-pljus, Herson, 388 p.
5. Soshko, A.I. and Soshko, V.A. (2008), *Smazochno-ohlazhdajushhie sredstva v mehanicheskoj obrabotke metalla*, Vol. 2, Oldi-pljus, Herson, 230 p.
6. Soshko, A.I. and Soshko, A.I. (2017), «Obosnovanie mehanoplazmennogo jeffekta, vznikajushhego v processe mehaniicheskoy obrabotki metalla v smazochno-ohlazhdajushhijh tehnologicheskijh sredstvah», *Metallofizika i novejshe tehnologii*, Vol. 39, pp. 117–140.
7. Seroshtan, T.P. (1980), *Issledovanie osobennostej termodiffuzionnogo nasyshhenija stalej iz polimersoderzhashhijh tehnologicheskijh sred*, Diss. of kand. tehn. nauk, spec. 05.16.01, 175 p.
8. Tugov, I.I. and Kostyrkin, G.I. (1989), *Himija i fizika polimerov*, Himija, Moskva.
9. Kuleznev, V.I. and Shershnev, V.A. (1988), *Himija i fizika polimerov*, Vysshaja shkola, Moskva.
10. Fordzjuk, Ju.I. (1989), *Kompleksnoe diffuznoe nasyshhenie stalej uglerodom, azotom, seroj, fosforom iz polimersoderzhashhijh sostavov*, Diss. of kand. tehn. nauk, spec. 05.02.01, 146 p.

Сошко Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент Харьковского национального технического университета.

Научные интересы:

– теория резания;

– смазочно-охлаждающие технологические средства в механической обработке металлов.

Тел.: (066) 488–93–51.

E-mail: sohking@gmail.com.

Подольский Михаил Игоревич – кандидат технических наук, доцент Харьковского национального технического университета.

Научные интересы:

– металлорежущие станки и инструменты;

– проектирование машиностроительных предприятий.

Тел.: (095) 021–46–79.

E-mail: Podolsky.Mihail@gmail.com.

Федорчук Дмитрий Дмитриевич – студент, магистр Харьковского национального технического университета.

Научные интересы:

– металлорежущие станки и инструменты.

Тел.: (095) 184–48–79.

E-mail: dimafedorchuk1111@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 04.10.2017.