

УДК 536.42:621.922

МЕТОДЫ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Шматов А.А.*Белорусский национальный технический университет, Минск, e-mail: shmatovalexander@gmail.com*

Настоящая статья посвящена обзору методов обработки, повышающих работоспособность инструментов и изделий либо путем нанесения защитных покрытий, либо путем изменения дислокационной и фазовой структуры, химического состава, напряженного и энергетического состояния поверхностного слоя и улучшения микрогеометрии (шероховатости) поверхности, либо путем изменения структурно-фазового состояния во всем объеме изделий. В работе предложена новая классификация известных способов упрочняющей обработки стальных, твердосплавных и алмазных металлообрабатывающих инструментов в зависимости от видов внешних воздействий на инструментальный материал, которые делятся на механические, физические, химические, физико-химические, термофизические, термохимические, термомеханические, термические и термоциклические методы. Анализ показал, что наиболее простыми, технологичными и эффективными являются термохимические методы поверхностного упрочнения и термоциклические методы объемного упрочнения металлообрабатывающих инструментов. Из них следует выделить следующие методы обработки: 1) высокотемпературный термохимический способ получения сверхтвердых карбидных покрытий, чтобы повысить сопротивление абразивному и диффузионному изнашиванию инструментов; 2) низкотемпературный термогидрохимический способ получения твердосмазочных покрытий, чтобы повысить сопротивление адгезионному и адгезионно-усталостному изнашиванию инструментов; 3) способ упрочняющей термоциклической обработки, чтобы улучшить износостойкие, прочностные и пластичные свойства целиком в объеме инструментов.

Ключевые слова: упрочняющая обработка, металлообрабатывающие инструменты

STRENGTHENING TREATMENT METHODS FOR METALWORKING TOOLS

Shmatov A.A.*Belarusian National Technical University, Minsk, e-mail: shmatovalexander@gmail.com*

This article is devoted to a review of treatment methods that increase the performance of tools and parts either by deposition a protective coatings or by changing the dislocation and phase structure, chemical composition, stress and energy state of the surface layer and improving microgeometry. (roughness) of the surface, or by changing the structural-phase state in the entire volume of the items. A new classification of known strengthening treatment methods of steel, carbide and diamond metalworking tools, depending on the types of external influences on the tool material is proposed in the paper; there are mechanical, physical, chemical, physicochemical, thermophysical, thermochemical, thermomechanical, thermal and thermocyclic methods in the classification. The analysis showed that thermochemical methods for surface strengthening and thermocyclic methods for volumetric strengthening of metalworking tools are the most simple, technological and effective its. Among them, the following processing methods should be highlighted: 1) a high-temperature thermo-chemical method for obtaining superhard carbide coatings to increase the resistance against abrasive and diffusion wear of the tools; 2) a low-temperature thermochemical method for obtaining solid lubricating coatings to increase the resistance against adhesive and adhesive-fatigue wear of the tools; 3) a method of strengthening thermocyclic treatment to improve the wear-resistant, strength and plastic properties as a whole in the volume of tools.

Keywords: strengthening treatment, metalworking tools

Согласно данным различных классификаций и обзоров в области упрочняющей обработки инструментов и изделий [1–3], существуют многочисленные методы повышения их работоспособности, что достигается либо путем нанесения защитных покрытий, либо путем изменения химического состава, дислокационной и фазовой структуры, напряженного и энергетического состояния поверхностного слоя, микрогеометрии (шероховатости) поверхности, либо путем изменения структурно-фазового состояния во всем объеме изделий [4]. В настоящей работе проведена систематизация методов упрочняющей обработки стальных, твердосплавных и алмазных инструментов (рисунок), условно разделенных на группы

в зависимости от видов внешних воздействий на инструментальный материал.

Механические методы [1, 2, 5], предназначенные для формирования полезных напряжений сжатия в поверхностной зоне изделия, включают: методы «холодной» поверхностной пластической деформации (ППД) путем ударно-вибрационной и ударно-барабанной обработки, дробеструйной и пневмодинамической обработки, фрикционно-упрочняющей обработки, нагартовки, накатки роликами, алмазного выглаживания, волочения, чеканки, хонингования, методом местного глубокого пластического деформирования (МГПД) и др. Механические методы также применяют для уменьшения адгезионного взаимодействия изделия

в зоне трения путем улучшения качества поверхности виброполированием, алмазным выглаживанием и механическим нанесением (натираем щеткой, трением, в барабане и др.) на поверхность изделия пластичных цветных сплавов и твердых слоистых материалов методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО); нанесением на поверхность твердых смазок на основе сульфидов, графита и других антифрикционных соединений с микро- и нанокристаллической структурой. Основным недостатком механических методов является ограниченное применение такой обработки для металлообрабатывающих инструментов.

Физические методы [6–8] включают: способы акустического, ультразвукового и магнитного воздействия с участием химической активной среды (ПАВ) и без нее, способ упрочнения энергией взрыва и импульсным током, электроэрозионное упрочнение и радиоактивное облучение. С их помощью можно увеличить плотность дефектов структуры и повысить уровень напряжений сжатия в поверхностной зоне, а в некоторых случаях и в объеме изделия. Для повышения антифрикционных и антикоррозионных свойств изделий используют «холодный» метод электромагнитного плакирования покрытия из нержавеющей и цветных сплавов за счет ударного электромагнитного соударения плакирующего слоя с подложкой. Физические методы пока носят опытно-исследовательский характер применения для инструментов.

Химические методы обработки [1, 8, 9] отличаются разнообразием; к ним относят: химическое (в водных средах) оксидирование, ингибирование, фосфатирование, никелирование, кобальтирование, др., а также осаждение композиционных химических покрытий (КХП) на базе никеля с дисперсными износостойкими и антифрикционными частицами графита, дисульфида молибдена, оксида циркония, алмаза и тугоплавких соединений; химическую обработку в жидких органических составах из полимерсодержащих поверхностно-активных веществ (ПАВ): в составах политетрафторэтилена («тефлона»), перфторполиэфира карбоновой кислоты («эпилама»), политетрафторэтилена (ПТФЭ); химическую обработку в нагретой жидкой среде на базе ПАВ, органических масел со слоистыми добавками в виде ультрадисперсных и наноразмерных частиц графита, алмаза, дисульфида молибдена, нитрида бора, др.; гидрохимический синтез тонких пленок из сульфидов и других соединений путем обработки поверхности в водных

сульфидообразующих и других химических растворах; обработку в кипящих водных растворах на основе водорастворимых органических веществ или тугоплавких соединений (ацетамида, оксида молибдена, др.). Химические методы отличаются простотой и высокой производительностью. Однако их эффективность в повышении работоспособности большинства инструментов невысокая.

Физико(электро)-химические методы [1, 9, 10] объединяют такие способы поверхностной обработки, как электрохимическое тонирование и электролитическое осаждение из водных растворов или суспензий металлических покрытий (Cr, Ni, др.), а также композиционных электрохимических покрытий (КЭП) с микро- и ультрадисперсными частицами оксидов, карбидов, сульфидов, алмаза и других тугоплавких соединений для повышения износостойкости покрытий; электроискровое натирание; электрохимическое и электроимпульсное полирование для снижения адгезионного взаимодействия поверхностей. Физико-химические методы эффективны для ограниченного числа инструментов, а при длительной обработке этими методами проявляется «краевой» эффект ускоренного нарастания покрытий на углах.

Термо(электро)физические методы [9–11], предназначенные для поверхностной обработки изделий, включают следующие способы: электрофоретическое осаждение порошковых композиционных покрытий с металлической или полимерной матрицей, армированной дисперсными частицами карбидов хрома, вольфрама, др. с последующим припеканием покрытия к подложке при температурах 1160–1300 °С; метод PVD (физическое осаждение из паровой фазы) для нанесения сверхтвердых и антифрикционных покрытий, в том числе наноструктурированных; плазменное, лазерное, электродуговое, детонационное, газопламенное напыление на рабочую поверхность порошковых металлических и керамических материалов разогретой струей, а также напыление жидкого металла и при взрыве проволоки; осаждение металлических и керамических покрытий в тлеющем разряде и путем электронно-лучевого или электронно-искрового испарения, магнетронным, катодным и вакуумно-плазменным распылением; а также разные виды поверхностной закалки: плазменная, магнитная, лазерная и токами высокой частоты. Термофизические методы эффективно повышают эксплуатационную стойкость различных инструментов, однако эти методы малопродуктивны и требуют применения дорогостоящего, в том числе вакуумного оборудования.

МЕТОДЫ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ	ОБЪЕМНЫЕ МЕТОДЫ	Термические методы обычные	Объемная закалка ступенчатая, прерывистая, струйная, с непрерывным охлаждением в одной среде и последующий отпуск, закалка с самоотпуском; криогенная обработка, др.
		Термические методы	Объемная многократная закалка с и без промежуточного отпуска, маятниковая, низко-, средне- и высокотемпературная ТЦО с закалкой на последнем цикле и затем отпуск, др.
	ПОВЕРХНОСТНЫЕ МЕТОДЫ	Термомеханические методы	Объемная высоко- и низкотемпературная термомеханическая обработка (ТМО), патентирование, получение инструментов методом порошковой металлургии, др.
		Термохимические методы	Горячее механическое и взрывное плакирование, нанесение покрытий горячим изостатическим прессованием и электромагнитной обработкой высоконагретых изделий, др.
			<p><i>При совместном термическом и химическом воздействии:</i> ХТО в твердой, жидкой, газовой, паровой фазе, вакууме; нанесение покрытий шликерным, CVD методами, разложением металлоорганики, наплавкой с помощью ТВЧ, лазера, газового пламени, электродуги, пучка ионов; смачивание жидкой смазкой СОТС кромки инструмента в процессе его работы, др.</p> <p><i>При раздельном термическом и химическом воздействии:</i> ТГХО инструмента, включающая обработку в кипящих водных средах на основе ПАВ и дисперсных металлосодержащих компонентов (оксидов металлов, их кислот и солей), и термообработку; окунание нагретого инструмента в эпилам с WO₃; погружение инструмента в расплавы металлов и жидкие среды с тугоплавкими соединениями с последующим нагревом, др.</p>
		Термофизические методы	Осаждение PVD покрытий, путем электронно-лучевого и электронно-искрового испарения, магнетронным и катодным распылением, плазменным, лазерным, электродуговым и детонационным напылением; местная плазменная, магнитная, лазерная закалка и с помощью ТВЧ, др.
		Физико-химические методы	Электроимпульсное, электрохимическое полирование, тонирование и осаждение покрытий, электроискровое натирание, др.
		Химические методы	Химическое полирование, оксидирование и осаждение покрытий, обработка в эпиламах, в кипящих растворах ацетамида, MoO ₃ , гидрoхимический синтез антифрикционных пленок, др.
		Физические методы	Акустическая, магнитная, ультразвуковая, электроэрозионная, электроимпульсная и детонационная обработка, радиоактивное облучение, электромагнитное плакирование, др.
		Механические методы	Ударно-вибрационная, ударно-барабанная, пневмодинамическая и дробеструйная обработка, накатка, алмазное выглаживание, чеканка, виброполирование, нанесение твердых смазок, ФАБО (натирание пластичными материалами), др.

Классификация методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов

Термохимические методы [1, 8, 12] условно можно разделить на две группы способов поверхностного упрочнения инструментов, которые отличаются порядком проведения термического и химического воздействия. *Первая группа методов*, проводимых при совместном термическом и химическом воздействии на изделие, включает: химико-термическую обработку (ХТО) для диффузионного оксидирования, фосфатирования, сульфидирования, азотирования, цианирования, борирования, хромирования, др. в твердой, жидкой, газовой, паровой фазе и в вакууме с облучением ионами; обработку в атмосфере пара; осаждение сверхтвердых и антифрикционных покрытий, в том числе наноструктурированных методом CVD (химического осаждения из паровой фазы); нанесение покрытий путем пиролитического разложения летучих металлоорганических веществ (карбониллов, др.) или восстановления галогенидов металлов водородом; нанесение износостойких покрытий наплавкой низкотемпературного припоя, содержащего сверхтвердые частицы, а также высокотемпературной наплавкой специального наплавочного материала на основе легирующих сплавов с высокотвердыми включениями карбидов, боридов, др. при нагреве ТВЧ, газовым пламенем, электрической дугой, лазерным лучом и пучком ионов; упрочнение инструмента, когда в процессе резания рабочая кромка смачивается специальными жидкими составами на основе углерода, азота, серы и других элементов или смазочно-охлаждающей технологической средой (СОТС), в результате чего во время ужесточения режимов резания происходит диффузионное насыщение поверхности резца указанными элементами эмульсии; шликерный метод получения покрытий, когда на поверхность изделия подается шликер из порошков Cr, Ni, B, Si, C, др. и затем он оплавляется в вакууме или в инертном газе. *Вторая группа методов*, проводимых при раздельном химическом и термическом воздействии на изделие включает: осаждение большинства химических покрытий (Fe-P, Ni, Ni-P, Co-P, Ni-B, Co-B, др.), а также композиционных химических покрытий с добавкой сверхтвердых дисперсных частиц и последующую термообработку при 200–500 °С, предназначенную для достижения различных задач: снятия внутренних напряжений и усиления прочности сцепления покрытий, повышения их твердости и других свойств; получение покрытий горячим окунаем изделия в расплавы эвтектических сплавов на базе Zr-Ni, Zr-Ni-Y, Co-Cr-Y с добавкой ZrO₂ и последующим отжигом при 1030–1100 °С; осаждение на поверхности оксидов и других соединений

золь-гель методом и методом термолитиза, которое осуществляют путем многократного погружения изделия в оксидосодержащие, металлоорганические или иные жидкие среды с соединениями металлов и неметаллов и последующего кратковременного нагрева в окислительной среде; нанесение композиционного покрытия путем многократного погружения предварительно нагретого (до 80–560 °С) инструмента из быстрорежущей стали в жидкой среде «эпилама» (перфторполиэфира карбоновой кислоты) с добавкой оксида вольфрама; нанесение твердосмазочных покрытий на инструменты из разных материалов путем термогидрохимической обработки (ТГХО), включающей сначала кипячение в водных средах из металлосодержащих (оксидов ванадия, молибдена, титана, хрома, их кислот и солей) и неметаллосодержащих компонентов (сульфанола) со свойствами ПАВ, затем нагрев в печи или соляной ванне в пределах 150–1030 °С, либо нагрев во время эксплуатации режущих инструментов.

В целом термохимические методы обработки технологически наиболее привлекательны. Они являются самыми распространенными среди методов поверхностного упрочнения благодаря простоте, большой производительности и использованию стандартного оборудования. Из высокотемпературных термохимических методов обработки следует выделить способ ХТО для получения сверхтвердых комплексных карбидных покрытий, чтобы повысить сопротивление абразивному, окислительному и диффузионному изнашиванию инструментов из сталей и твердых сплавов. А среди низкотемпературных термохимических методов обработки лучше всего показал себя способ ТГХО для создания твердосмазочных покрытий, которые увеличивают сопротивление адгезионному и адгезионно-усталостному изнашиванию стальных, твердосплавных и алмазных инструментов [8].

Термомеханические методы обработки [1, 13, 14] оказывают упрочняющее воздействие на поверхностную зону или весь объем изделий. *Первая группа* поверхностных методов упрочнения включает: механическое (прокаткой, экструзией) и взрывное высокотемпературное плакирование хромоникелевых, алюминиевых и других сплавов; нанесение металлических и металлокерамических покрытий горячим изостатическим прессованием при высоких давлениях от 10 до 830 МПа и температурах до 1100–1800 °С, а также электромагнитной обработкой высоконагретых изделий; многослойное механическое нанесение (кистью, окунаем, распылением) на инструмент твердой смазки в виде раствора, содержаще-

го ПАВ (алкиловый фенолполигликоловый спирт), трехокись хрома, моноалюминиевый фосфат и дисульфид молибдена с последующим 1–3-часовым нагревом при 180–250 °С. *Вторая группа* объемных методов упрочнения включает: патентирование, высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) и низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО) заготовок из сталей и сплавов, получение инструментов или их заготовок методом порошковой металлургии путем высокотемпературного изостатического прессования порошков инструментальных сталей, твердых сплавов и сверхтвердых материалов. Недостатком термомеханических методов обработки является применение дорогостоящего оборудования. Причем процессы поверхностного термомеханического упрочнения инструментов в основном малопроизводительны, а сами покрытия не всегда имеют качественную поверхность и требуют доводки. Процессы объемного термомеханического упрочнения получили распространение в порошковой металлургии для изготовления высокопрочных инструментов, поверхность которых пока еще имеет недостаточную твердость и износостойкость.

Термические методы [1, 14, 15], предназначенные для объемного упрочнения стальных инструментов, включают: упрочняющие способы термической обработки путем проведения струйной, ступенчатой, изотермической, прерывистой закалки или при непрерывном охлаждении в одной среде с последующим отпуском, а также закалки с самоотпуском; криогенную обработку путем обработки холодом закаленных инструментов; а также способы термоциклического упрочнения путем проведения маятниковой, низко-, средне- и высокотемпературной термоциклической обработки с закалочным охлаждением на последнем цикле или путем многократной закалки, многократной закалки с промежуточным отпуском, которые завершаются обязательным проведением отпуска после закалочного охлаждения. Все термические методы объемного упрочнения высокопроизводительны, просты и осуществляют на традиционном оборудовании. Причем наиболее эффективной является технология упрочняющей термоциклической обработки, формирующей мелкоизмельченную структуру во всем объеме упрочненной инструментальной стали, что обеспечивает инструментам целый комплекс высоких эксплуатационных (износостойких, прочностных, пластичных) свойств [8, 15].

Заключение

Среди большого числа известных технологий упрочняющей обработки наиболее

простыми, производительными и эффективными являются термохимические методы поверхностного упрочнения и термоциклические методы объемного упрочнения металлообрабатывающих инструментов. Из них технологически более привлекательны следующие методы: 1) высокотемпературная термохимическая обработка для получения сверхтвердых карбидных покрытий, чтобы повысить сопротивление абразивному и диффузионному изнашиванию инструментов из сталей и твердых сплавов; 2) низкотемпературная термогидрохимическая обработка для получения твердосмазочных покрытий, чтобы повысить сопротивление адгезионному и адгезионно-усталостному изнашиванию стальных, твердосплавных и алмазных инструментов; 3) упрочняющая термоциклическая обработка, чтобы улучшить износостойкие, прочностные и пластичные свойства во всем объеме стальных инструментов. Использование на практике указанных технологий упрочняющей обработки позволит решить важнейшую проблему повышения работоспособности металлообрабатывающих инструментов.

Список литературы

1. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов. М.: Машиностроение, 1986. 320 с.
2. Москвитин Г.В. Методы упрочнения поверхностей деталей машин. М.: Красанд, 2008. 400 с.
3. Махутов Н.А. Научные основы повышения малоциклового прочностного. М.: Наука, 2006. 623 с.
4. Шматов А.А., Смиловенко О.О. Низкотемпературное поверхностное упрочнение алмазного инструмента // Вестник Белорус. нац. тех. ун-та. Сер. Машиностроение. 2009. № 1. С. 27–32.
5. Гончаров В.С. Методы упрочнения конструкционных материалов. Функциональные покрытия. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. 205 с.
6. Бараз В.Р., Филиппов М.А. Физические основы упрочнения и разрушения материалов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 192 с.
7. Шелег В.К., Жигалов А.Н., Богдан Д.Д. Исследование влияния аэродинамического звукового упрочнения на износ металлорежущих твердосплавных пластин с покрытием // Наука и техника. Сер. Машиностроение. 2020. Т. 19. № 4. С. 271–279.
8. Шматов А.А. Научные и технологические основы термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 и 05.02.07. Минск, 2020. 344 с.
9. Лобанов М.Л., Кардонина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. Защитные покрытия. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 200 с.
10. Никифоров В.И. Электрохимические и электрофизические технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. 302 с.
11. Жидков И.С., Кухаренко А.И., Чолах С.О. Электрофизические методы обработки материалов. Екатеринбург: Изд-во Урал. федерал. ун-та, 2019. 195 с.
12. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 335 с.
13. Багитцев А.А., Бодягин С.С., Егоров А.С. Упрочнение инструмента термомеханической обработкой при штамповке // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 72.
14. Козловский А.Э., Колобов М.Ю. Термическая обработка углеродистых сталей. Иваново: Изд-во Иван. гос. хим.-технол. ун-та, 2017. 144 с.
15. Лыгденов Б.Д., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. Термоциклирование. Структура и свойства. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 251 с.