

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРОЧНЕНИИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

© 2015

Б.М. Бржозовский, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»

В.В. Мартынов, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»

Е.П. Зинина, доктор технических наук,
доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»
Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов (Россия)

Ключевые слова: металлорежущий инструмент; упрочнение; низкотемпературная плазма; тепловые процессы; термопара; лаговая температура; ток смещения.

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментального исследования тепловых процессов при упрочнении металлорежущего инструмента в низкотемпературной плазме комбинированного разряда на установке «Хром».

На первом и втором этапах исследования было определено влияние подводимой в зону обработки СВЧ-мощности на прохождение температурного фронта в системе «плазма – инструмент – держатель» в ходе процессов нагрева и охлаждения инструмента и формирование значений температуры в корпусе держателя инструмента вне зоны плазменного воздействия, т. е. лаговой температуры.

Результаты выполнения первого этапа позволили установить, что приращение лаговой температуры определяется степенью протекания амбиполярных процессов как вблизи нижней границы плазмы (на низких уровнях подводимой СВЧ-мощности), так и во всем дрейфовом пространстве (на высоких уровнях подводимой СВЧ-мощности).

Результаты выполнения второго этапа показали, что преобладание в начальной стадии нагрева тенденции распространения больших потоков тепла, подводимого из плазмы, в объем инструмента может привести к перегреву и отпуску инструментальной матрицы. Причиной является «запирание» тепла в зоне нагрева, поскольку к этому моменту еще не сформировался канал его отвода через конвективное излучение и на массивные теплоемкие элементы (держатель и хвостовик инструмента), скорость распространения которого значительно выше скорости распространения фронта температуры.

На третьем этапе при исследовании влияния скорости изменения температуры на физико-механические свойства инструмента, сформированные в процессе его изготовления, было установлено, что изменение скорости роста температуры и времени отключения плазмы может существенно изменить эксплуатационную надежность инструмента.

В целом результаты исследования позволили показать, что для получения воспроизводимых результатов упрочнения, удовлетворяющих критериям создания на поверхности рабочей части инструмента слоя с заданными структурой и физико-механическими свойствами, процессом распространения потока тепла в зоне плазменной обработки необходимо управлять.

Развитие и совершенствование методов поверхностной обработки режущего инструмента, направленной на повышение его износостойкости, является актуальной задачей теории и практики резания металлов. Разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, направленных на повышение твердости и износостойкости [1–12]. Значительная часть из них – это методы обработки с применением концентрированных потоков энергий [13–21], в частности низкотемпературной плазмы комбинированного разряда пониженного давления [21], которые позволяют формировать на поверхности рабочей части инструмента износостойкий модифицированный слой.

Основная технологическая задача модифицирующего воздействия плазмы, генерируемой непосредственно у поверхности инструмента, заключается в создании такого температурного режима, который обеспечит сохранение исходных свойств сердцевины и повышение твердости поверхностного слоя с заданной структурой и физико-механическими свойствами, сформированными в процессе изготовления инструмента.

Исследование тепловых процессов выполнялось в три этапа с помощью термопары, расположенной в корпусе

держателя инструмента вне зоны плазменного воздействия (рис. 1), т. е. в качестве объекта исследования выступала лаговая температура, значения которой ежесекундно регистрировались автоматической системой на базе модуля ADAM-4018 с точностью 0,1 °С. На первом этапе исследование выполнялось на образце при его обработке в установке для низкотемпературного плазменного упрочнения «Хром» [21] на различных сочетаниях параметров технологического режима: подаваемом на образец потенциале смещения +190 В и анодных токах магнетрона от 5 до 90 мА с шагом 5 мА, что соответствовало интервалу подводимой в рабочую камеру установки СВЧ-мощности от 10 до 150 Вт. В процессе исследования регистрировались также ток смещения $I_{\text{смещ}}$ посредством микромилливольтамперметра М-62 (класс точности 0,2) и эмиссионные спектры плазмы посредством USB-спектрометра Ocean Optics QE 65000 фирмы Ocean Optics (США) в интервале длин волн 400–900 нм с точностью 1 нм.

Сопоставление изменений приращения лаговой температуры (т. е. скорости ее изменения ΔT в течение 10 с), тока смещения $I_{\text{смещ}}$ и интенсивностей спектральных линий в коротковолновой части эмиссионного

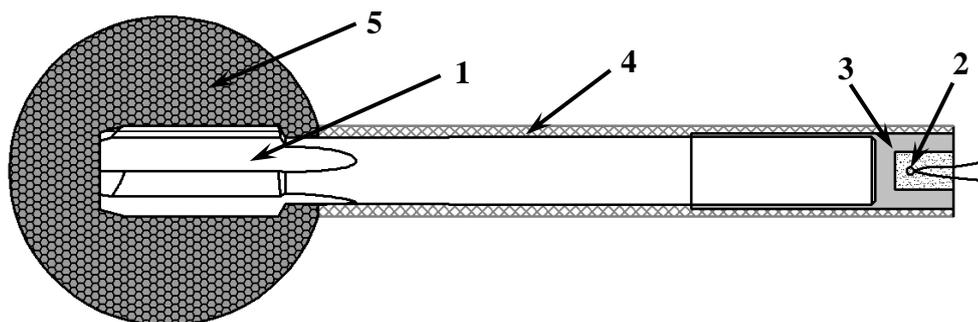


Рис. 1. Схема расположения термопары (2) при обработке инструмента (1) в низкотемпературной плазме комбинированного разряда (5):
3 – держатель инструмента; 4 – слой защитной изоляции

спектра плазмы в зависимости от уровня подводимой СВЧ-мощности позволило установить следующее:

- увеличение концентрации электронов вблизи нижней границы плазмы выше критического значения приводит к увеличению тока смещения, изменению скоростей ионизации и рекомбинации и как следствие этих процессов – к снижению приращения лаговой температуры;

- образование пологих характеристик тока смещения и интенсивностей спектральных линий в интервале анодного тока магнетрона от 30 до 45 мА связано с усилением ионизационно-рекомбинационных процессов в дрейфовом пространстве плазмы, что приводит к обеднению ее нижней границы электронной составляющей;

- приращение лаговой температуры за период регистрации сигнала термопары носит нелинейный, затухающий характер;

- изменение приращения лаговой температуры имеет различные (в том числе нулевые) значения, что свидетельствует об изменении механизма доставки заряженных частиц на поверхность, проявляющемся в образовании перегибов на кривых тока смещения и интенсивностей спектральных линий;

- усиление кулоновского взаимодействия заряженных частиц во всем объеме плазмы (диапазон анодного тока магнетрона от 50 до 70 мА) ведет к усилению амбиполярных процессов, что снижает ее неидеальность;

- повышение концентрации электронов до уровня начала формирования амбиполярных процессов во всем объеме плазмы приводит к существенной компенсации пространственного заряда, что проявляется в снижении величины тока смещения $I_{\text{смещ}}$, формировании куполообразной характеристики на графиках интенсивностей спектральных линий во всем диапазоне длин волн эмиссионного спектра, значительному росту приращения температуры и, соответственно, температуры при изменении уровня подводимой СВЧ-мощности в диапазоне анодного тока магнетрона от 75 до 85 мА. Дальнейшее увеличение мощности приводит к нарушению квазинейтральности, снижению приращения температуры, повышению тока смещения, снижению интенсивности спектральных линий, т. е. нарушению протекания амбиполярных процессов в плазме.

Таким образом, приращение лаговой температуры определяется степенью протекания амбиполярных процессов как вблизи нижней границы плазмы (на низких уровнях подводимой СВЧ-мощности), так и во всем дрейфовом пространстве (на высоких уровнях подводимой СВЧ-мощности).

На втором этапе исследования определялись особенности прохождения температурного фронта в системе «плазма – инструмент – держатель». С этой целью был проведен имитационный эксперимент, в котором в качестве источника тепла использовалось пламя спиртовки в желтой зоне с температурой 800 °С. Для регистрации теплового излучения на инструменте использовался тепловизор модели FLIR.

Расшифровка записей тепловизора при нагреве метчика М10 в течение 400 с и его последующего охлаждения позволила получить данные о распространении фронта температуры при нагреве инструмента (рис. 2), а также данные о ходе процессов нагрева и охлаждения, позволившие реконструировать траекторию изменения температуры (рис. 3).

Анализ экспериментальных данных позволил установить следующее.

1. В начальной стадии преобладает тенденция распространения тепла в объем инструмента (рис. 2).

2. Максимального значения температура на поверхности инструмента достигает в течение первых 100–120 с (рис. 3). Предположительно именно в этот период может произойти перегрев и отпуск инструментальной матрицы. Причиной являются большие потоки тепла, подводимого из плазмы, которое будет запереться в зоне нагрева, поскольку в этот момент времени еще не сформировался канал его отвода через конвективное излучение и на массивные теплоемкие элементы (держатель и хвостовик инструмента).

3. Скорость распространения фронта конвективного излучения по длине инструмента значительно выше скорости распространения фронта температуры.

4. Снижение скорости распространения фронта температуры связано с усилением влияния конвективного излучения.

5. Точка перегиба, расположенная на расстоянии 43 мм от начала инструмента в зоне нагрева, присутствует на обоих графиках. Изменение скорости распространения

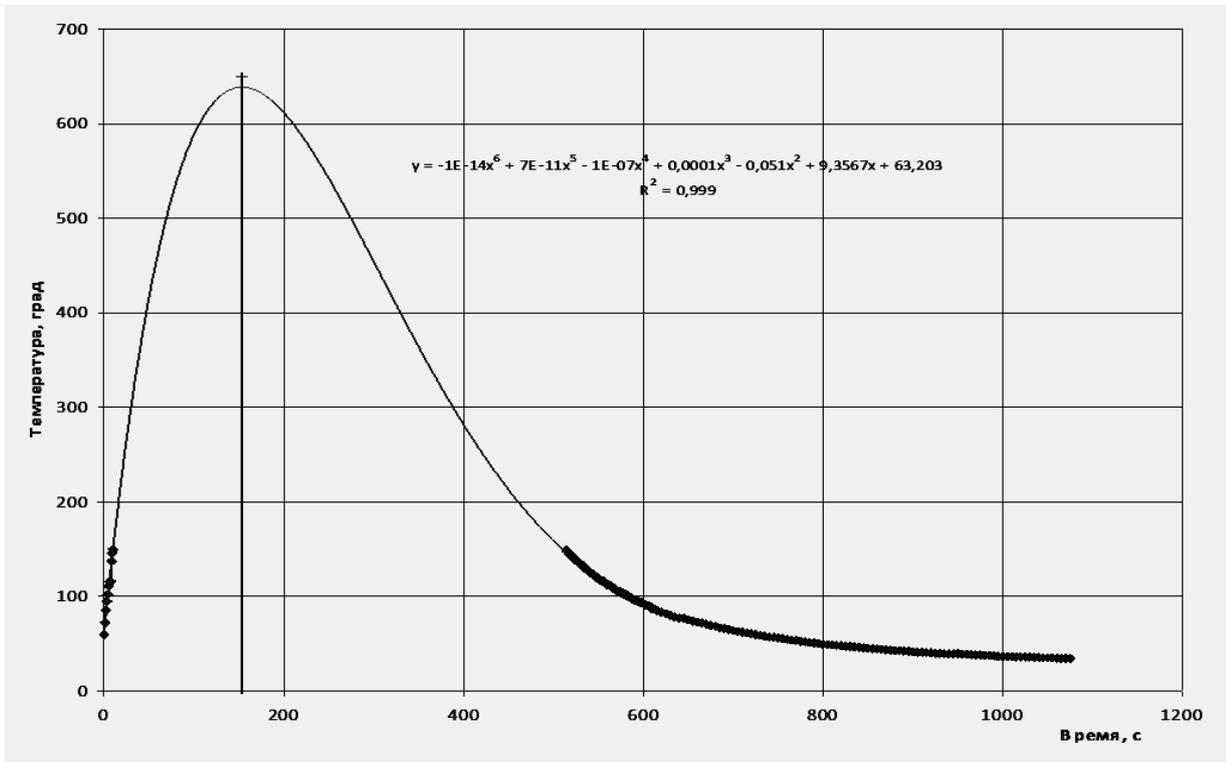
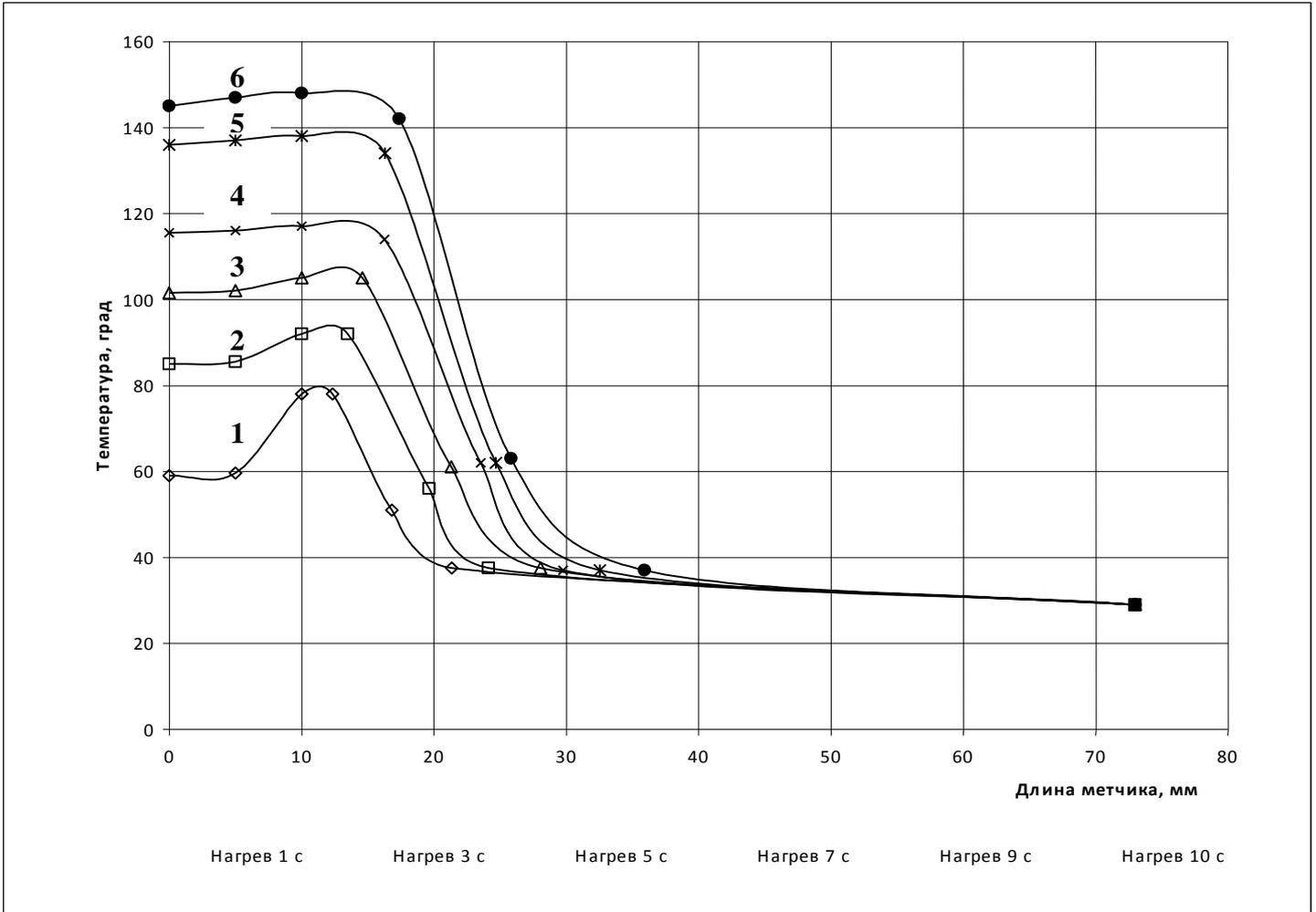


Рис. 3. Изменение температуры в ходе эксперимента (реконструкция)

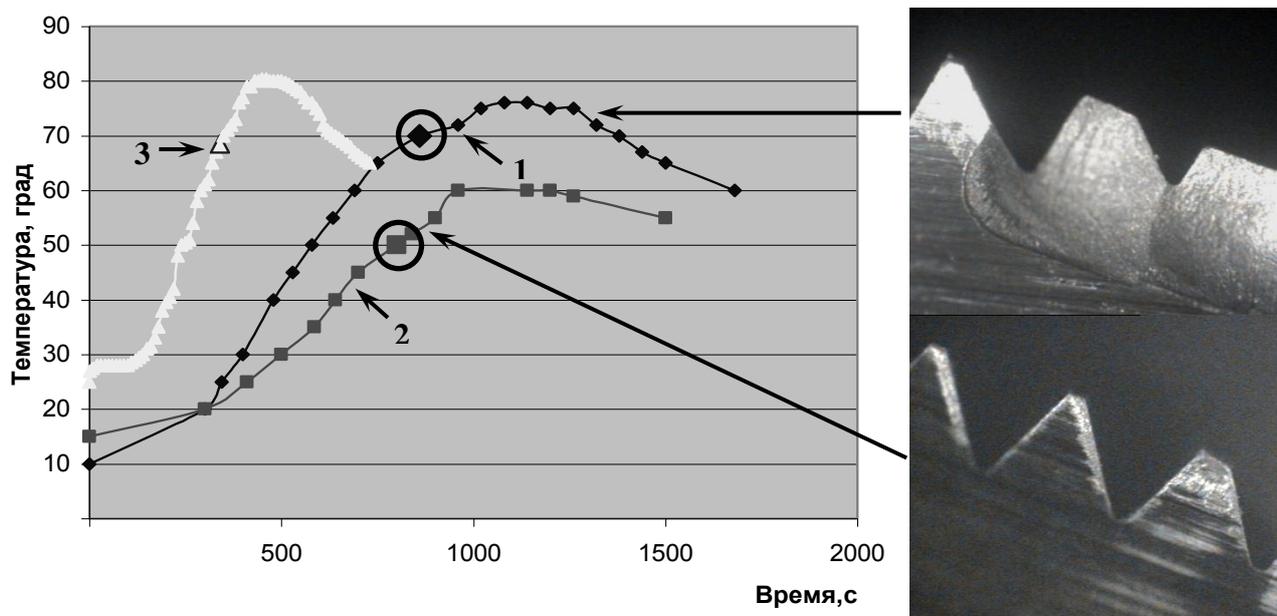


Рис. 4. Графики изменения температуры при обработке метчиков $M12 \times 1,25$ мм в низкотемпературной плазме комбинированного разряда с длиной зоны обработки 25 мм (1) и 20 мм (2) и в пламени спиртовки с длиной зоны обработки 20 мм (3); *O* – окончание воздействия плазмы

фронта конвективного излучения возможно связано с изменением теплоемкости материала хвостовика инструмента.

На третьем этапе исследования было выполнено сравнение температуры при обработке реального инструмента при одинаковых технологических режимах, но разной площади поверхности обработки (рис. 4). Результаты показали, что увеличение скорости изменения температуры может сказаться на изменении исходных физико-механических свойств сердцевины инструмента, сформированных в процессе его изготовления (это видно на приведенных на рис. 4 photographs состоянии режущих кромок). Анализ графиков на рис. 4 показал, что при плазменной обработке: по окончании воздействия плазмы наблюдается различный характер хода кривых температуры: плавное возрастание на 7–12 градусов и последующее убывание (метчик 1), стабилизация в течение 2–3 минут и последующее плавное охлаждение (метчик 2); изменение скорости роста температуры и времени отключения плазмы может существенно изменить эксплуатационную надежность инструмента.

В целом результаты выполненного исследования позволяют сделать вывод о том, что передача и распространение потока тепла в поверхностном слое зависят от условий генерации низкотемпературной плазмы и определяют характер протекающих при этом процессов как вблизи ее нижней границы, так и во всем дрейфовом пространстве. В связи с этим для формирования износостойкого модифицированного слоя процесс упрочнения необходимо рассматривать как совокупность двух последовательных фаз: нагрева инструмента скомпенсированным потоком плазмы до температур формирования тонкого слоя расплава на поверхности элементов структуры его рабочей части в результате эффективной передачи энергии поверхностным атомам; охлаждения инструмента при пониженном давлении для фиксации сформированного расплава.

Продолжительность процесса упрочнения в общем случае является величиной переменной и определяется в пространстве его вход/выходных параметров согласованием их значений между собой по критерию обеспечения целенаправленного распространения потока тепла в поверхностном слое. Для получения же воспроизводимых результатов упрочнения, удовлетворяющих критериям создания на поверхности рабочей части инструмента слоя с заданными структурной и физико-механическими свойствами, необходимо управлять процессом распространения потока тепла в зоне плазменной обработки. Представленные в статье материалы показывают, что возможности практической реализации такого управления имеются.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
2. Лашманов В.И. Повышение износостойкости инструмента // ПРОИнструмент. 2002. № 18. С. 16–18.
3. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Ким В.А., Мокрицкий Б.Я., Алтухова В.В., Киричек А.В. Научные технологии упрочнения инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 6. С. 19–24.
4. Котков Ю.К., Наумов А.Г. Повышение износостойкости металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей // Физика трибологических систем: сб. ст. Иваново: Иванов. хим.-техн. ин-т, 1988. С. 94–98.
5. Боровушкин И.В. Повышение стойкости режущего инструмента ионно-плазменным напылением // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств: межвуз. сб. науч. тр. Л.: Ленинград. лесотехнич. академия, 1988. С. 30–33.

6. Повышение стойкости режущего инструмента путем изменения адгезионно-прочностных свойств износостойкого покрытия / В.П. Табаков [и др.] // Станки и инструмент. 1990. № 3. С. 22–23.
7. Мигранов М.Ш. Исследование износостойких покрытий для режущего инструмента с нанокристаллической структурой // Известия вузов. Машиностроение. 2005. № 1. С. 56–62.
8. Верещака А.С., Терентьев И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
9. Смольников Е.А. Термическая и химико-термическая обработка инструментов в соляных ваннах. М.: Машиностроение, 1989. 148 с.
10. Разработка и внедрение технологии химико-термической обработки деталей и инструмента в условиях тлеющего разряда: отчет о НИР № ГР 80005837; инв. № 02840 035457. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. 106 с.
11. Блинков И.В., Волхонский А.О., Аникин В.Н., Скрылева Е.А. Мультислойные наноструктурные покрытия TiAlN/ZrNbN/CrN, полученные методом Arc-PVD, для режущего твердосплавного инструмента // СТИИ. 2012. № 5. С. 18–24.
12. Курочкин А.В. Технологические особенности многофункциональных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента // Вестник РГГА. 2010. № 3. С. 166–172.
13. Плазмохимическое упрочнение инструментальных сплавов / В.Б. Тригуб [и др.] // Разработка, производство и применение инструментальных материалов: сб. докл. VI республик. семинара. Киев: Ин-т проблем материаловедения им. И.Н. Францевича АН УССР, 1990. С. 45–46.
14. Бровер Г.И., Шульга А.А., Русин П.И. Особенности лазерной и электронно-лучевой обработки инструментальных сталей // Электронная обработка материалов. 1989. № 1. С. 15–18.
15. Латышев В.Н., Наумов А.Г., Новиков В.В., Суханов Р.С., Шварев Е.А. Повышение стойкости быстрорежущего инструмента ионно-лазерным поверхностным упрочнением // Станки и инструмент. 2005. № 6. С. 17–20.
16. Дашкевич И.П., Княжевская Г.С., Томашевич Ю.Г. Плазменное упрочнение металлообрабатывающего инструмента и штамповой оснастки // Новая высокочастотная техника для машиностроительного производства: сб. науч. тр. М.: ВНИИЭТО, 1988. С. 32–37.
17. Ли И.П., Рухляда Н.Я. Создание поверхностных структур с заданными свойствами с помощью концентрированных потоков частиц // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 1. С. 61–65.
18. Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А., Филимонов С.Ю., Овчаренко В.Е. Электронно-пучковая модификация плазменных металлокерамических покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 12. С. 17–22.
19. Погребняк А.Д., Ремнев Г.Е., Чистяков С.А., Легачев А.Е. Модификация свойств металлов под действием мощных ионных пучков // Известия ВУЗов. Физика. 1987. № 1. С. 52–55.
20. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 176 с.

REFERENCES

1. Grigoryev S.N. *Metodi povisheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Methods of cutting tool hardening]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2009, 368 p.
2. Lashmanov V.I. Tool wear resistance increase. *PROinstrument*, 2002, no. 18, pp. 16–18.
3. Vereshchaka A.S., Grigor'ev S.N., Kim V.A., Mokritskiy B.Ya., Altukhova V.V., Kirichek A.V. Science intensive technologies of tool hardening. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2013, no. 6, pp. 19–24.
4. Kotkov Yu.K., Naumov A.G. Increase of wear resistance of high-speed steel tool. *Fizika tribologicheskikh sistem*. Ivanovo, Ivanovskiy khimiko-tekhnologicheskyy institut publ., 1988, pp. 94–98.
5. Borovushkin I.V. Hardening of cutting tool using ion-plasma sputtering. *Stanki i instrumenti derevoobrativayushchikh proizvodstv*. Leningrad, Leningradskaya lesotekhnicheskaya akademiya publ., 1988, pp. 30–33.
6. Tabakov V.P. et al. Hardening of cutting tool by changing the adhesive strength properties of wear-resistant coating. *Stanki i instrument*, 1990, no. 3, pp. 22–23.
7. Miganov M.Sh. Study of wear-resistant coatings for cutting tool with nanocrystal structure. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2005, no. 1, pp. 56–62.
8. Vereshchaka A.S., Terentyev I.P. *Rezhushchye instrumenti s iznosostoykimi pokrytiyami* [Cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986, 192 p.
9. Smolnikov E.A. *Termicheskaya i khimiko-termicheskaya obrabotka instrumentov v solyanikh vannakh* [Thermal and thermo-chemical processing of tools in salt-bath]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989, 148 p.
10. Development and implementation of technology of thermo-chemical processing of details and tool in the terms of glow discharge: research report № GR 80005837; inv. № 02840 035457. Moscow, MVTU im. N.E. Bauman publ., 1983, 106 p.
11. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O., Anikin V.N., Skryleva E.A. Multi-layer nano-structural TiAlN/ZrNbN/CrN coatings produced using the Arc-PVD method for hard-metal cutting tool. *STIN*, 2012, no. 5, pp. 18–24.
12. Kurochkin A.V. Technological characteristics of multi-purpose nano-structured coatings for cutting tool. *Vestnik RGATA*, 2010, no. 3, pp. 166–172.
13. Trigub V.B. et al. Plasma-chemical strengthening of tool alloys. *Sbornik dokladov VI respublikanskogo seminaru "Razrabotka, proizvodstvo i primenenie instrumentalnykh materialov"*. Kiev, 1990, pp. 45–46.
14. Brover G.I., Shulga A.A., Rusin P.I. Special aspects of laser and electron-beam treatment of tool steels. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1989, no. 1, pp. 15–18.
15. Latishev V.N. et al. Hardening of high-speed cutting tool using the nano-laser surface strengthening. *STIN*, 2005, no. 6, pp. 17–20.

16. Dashkevich I.P., Knyazhevskaya G.S., Tomashevich Yu.G. Plasma strengthening of metal working tool and die tooling. *Novaya vysokochastotnaya tekhnika dlya mashinostroitel'nogo proizvodstva*. Moscow, VNIIEТО, 1988, pp. 32–37.
17. Lee I.P., Rukhlyada N.Ya. Producing the surface structures with the help of concentrated flows of particles. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2005, no. 1, pp. 61–65.
18. Ivanov Yu.F., Ovcharenko V.E., Kolubaeva Yu.A., Filimonov S.Yu. Electron beams modification of plasma metal-ceramic coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2008, no. 12, pp. 17–22.
19. Pogrebnyak A.D., Remnev G.E., Chistyakov S.A., Legachev A.E. Modification of the properties of metals by high-power ion beams. *Russian physics journal*, 1987, vol. 30, no. 1, pp. 39–48.
20. Uglov V.V. et al. Plasma-immersion nitrogen implantation into high-speed cutting steel. Phase composition and mechanical properties. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1999, no. 5, pp. 18–25.
21. Brzhozovsky B.M., Martinov V.V., Zinina E.P. *Uprochnenie rezhushchego instrumenta vozdeystviem nizkotemperaturnoy plazmi kombinirovannogo razryada* [Cutting tool strengthening by influence of low-temperature combined discharge plasma]. Saratov, Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet publ., 2009, 176 p.

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL PROCESSES WHEN STRENGTHENING THE METAL-CUTTING TOOLS IN LOW-TEMPERATURE PLASMA

© 2015

B.M. Brzhozovsky, Doctor of Engineering, Professor,

Professor of the Department of Design of engineering and technological complexes

V.V. Martynov, Doctor of Engineering, Professor,

Professor of the Department of Design of engineering and technological complexes

E.P. Zinina, Doctor of Engineering,

assistant professor of the Department of Design of engineering and technological complexes

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov (Russia)

Keywords: metal-cutting tool; strengthening; low-temperature plasma; thermal processes; thermocouple; lagged temperature; bias current.

Abstract: The article gives the results of experimental study of thermal processes when strengthening the metal-cutting tool in low-temperature plasma of combined discharge using the “Chrom” plant.

The first and the second stages of study identified the influence of fed to the processing zone SHF-power on the passage of temperature front in the “plasma – tool – holder” system in the process of tool heating and cooling and the forming of temperature values in the tool holder body out of the zone of plasma influence, i.e. lagged temperature.

The results of the first stage of study made it possible to identify that the lagged temperature increment depends on the degree of the ambipolar process reaction both near the plasma low bound (on the low levels of fed SHF-power) and within the whole drift space (on the high levels of fed SHF-power).

The results of the second stage showed that the domination of tendency to propagation of large flows of heat fed from plasma to the tool space at the initial stages may lead to the over-heating and tool base tempering. The reason is the “closing” of heat in the heating zone which propagation velocity is notably higher than the temperature front propagation velocity. It caused by the fact that, for this moment, the channel for heat rejection through convective emission and to the massive heat elements (tool holder and tail end) is not formed yet.

During the third stage, while studying the influence of temperature rate of change on the tool physical and mechanical properties formed in the process of its production, the authors revealed that the change of temperature increase rate and plasma turn-off time may change considerably the tool service reliability.

In the whole, the results of research made it possible to display that the process of heat flow propagation in the plasma treatment zone should be controlled to get the reproducible strengthening results complying with the criteria of creation of a course with a specified structure and physical and mechanical properties on the tool working part surface.