

УДК 621.961

УПРОЧНЕНИЕ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА «СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ»

С.М. УШЕРЕНКО

(ИПК и ПК Министерства образования Республики Беларусь),

В.И. ОВЧИННИКОВ, О.И. КОВАЛЬ

(НИИ импульсных процессов с ОП БГНПК порошковой металлургии НАН Беларуси),

С. ЗИОЛКЕВИЧ

(Институт пластической обработки, г. Познань, Польша)

Рассмотрены теоретические предпосылки и экспериментальные результаты по упрочнению штампового инструмента с использованием эффекта «сверхглубокого проникания» и совмещения с диффузионным азотированием. Показаны возможности разработки комплексных технологий упрочнения штампового инструмента, создания локальных упрочненных зон в областях интенсивного износа.

Введение. Штамповая оснастка в процессе работы изнашивается неравномерно. Износ в областях, где происходит прогиб и затекание материала заготовки, зачастую в 2...5 раз превышает износ других областей штамповой оснастки. Соответственно материал наиболее изнашиваемых частей должен обладать более высоким уровнем износостойкости. Проблему неравномерного износа решают в основном двумя способами. По первому варианту всю штамповую оснастку изготавливают из материала, способного работать в условиях интенсивного износа, как правило, из твердого вольфрамкобальтового сплава. Второй вариант предполагает изготовление сборной штамповой оснастки из различных по износостойкости материалов. Этот вариант позволяет существенным образом (в 3...5 раз) уменьшить массу используемого твердого сплава. Однако требуется существенное увеличение затрат на механическую обработку и сборку.

Применение локального упрочнения инструмента за счет эффекта сверхглубокого проникания позволяет существенно расширить технологические возможности создания штамповой оснастки с заданными упрочненными участками в цельнометаллической детали. Обработка материала штампов потоком дискретных частиц порошка, ускоренных энергией взрыва, позволяет получать заготовки с анизотропией физико-механических свойств на участках объемом 50×50×200 мм в местах максимального износа.

Известные возможности материаловедения в машиностроении позволяют создавать материалы с различным уровнем физико-механических свойств. Для штамповой оснастки широко используются инструментальные стали и твердые сплавы. Наиболее высокий уровень стойкости до настоящего времени обеспечивали вольфрамкобальтовые сплавы. Поэтому их использование в штамповой оснастке постоянно расширялось, особенно в массовом производстве, несмотря на значительную стоимость.

Однако после опубликования результатов исследований, выполненных в Европейской ассоциации порошковой металлургии, появилось дополнительное ограничение, так как твердые сплавы признаны канцерогенными для изготовителей и потребителей.

Наиболее близко к ним по стойкости стоят инструментальные штамповые стали. Уровень их износостойкости в 50...100 раз ниже, чем у твердых сплавов типа карбид-вольфрам-кобальт, однако ударная вязкость, предел прочности на изгиб и технологичность изготовления штамповой оснастки существенно выше. Необходимо признать, что штамповая оснастка из твердого сплава и инструментальных сталей не обеспечивает задания градиента износостойкости по форме изделия. Поэтому достаточно широко используют технологии поверхностного упрочнения рабочих частей инструмента. Это различные виды наплавки и напыления износостойких материалов, а также химико-термические покрытия. С позиции минимизации доводочных операций при изготовлении штампов наиболее интересна химико-термическая обработка. В матричном материале возникают износостойкие слои на основе азота, углерода, кремния и бора. Наиболее существенным недостатком такой обработки является то, что толщина этого слоя ограничивается за счет разницы физико-механических свойств слоя и матрицы. При превышении определенных в каждом конкретном случае критических размеров упрочненный слой начинает отслаиваться от матрицы и эффективность упрочнения резко снижается. Поэтому целесообразно рассмотреть другие комплексные технологические подходы, которые основываются на новых физических явлениях.

Исходные предпосылки. При обработке материалов и сплавов различными методами динамического упрочнения широко используют энергию взрыва. Многократная взрывная обработка, обеспечивая существенную деформацию, в какой-то мере является аналогомковки. Менее известны процессы, происходящие в материалах при их нагружении высокоскоростной струей частиц.

В механике многие сотни лет существует представление о том, что независимо от параметров удара глубина внедрения ударников в преграду не превышает шести их определяющих размеров. При этом реализуемая плотность энергии не может превышать 10^9 Дж/м³. Повышение энергии удара, как правило, приводит к увеличению диаметра формируемой каверны, расплавлению матричного материала или, в

крайнем случае, к испарению ударников. Это ограничение с позиции физики задается постоянной энергоемкостью материала преграды. Таким образом, было сформировано барьерное ограничение на проникновение частиц в преграду при высокоскоростном ударе.

Вследствие расширения исследований в этой области во второй половине XX века, улучшения приборной базы, происходило накопление информации о так называемых аномальных результатах. К ним относятся случаи кратерообразования с относительными глубинами свыше 10 калибров и образования колбообразных кратеров [1].

В 1974 г. в Институте импульсных процессов было обнаружено физическое явление при проникании, в границах которого устойчиво наблюдались кратеры-каналы с отношением глубины к размеру ударника в диапазоне от 10^2 до 10^4 [1]. Сгусток микрочастиц с относительно низкой скоростью (больше 500 м/с) проникает в металлическую преграду на глубины в десятки и сотни миллиметров. Был установлен диапазон условий взаимодействия потока частиц с металлическими преградами, при которых сопротивление прониканию при ударе снижается на несколько порядков.

С точки зрения металлографии процесс сверхглубокого проникания частиц в сталь представляет собой появление длинномерных канальных образований дефектной структуры. Плотность таких канальных образований дефектной структуры достигает 1500 шт./мм². При проникании частиц износостойкой керамики, например карбида кремния или борида ниобия, происходит размывание вводимого материала по стенке канала, а после захлопывания последнего образование армирующих волокон, состоящих из матричного и вводимого материала. Обработанная сталь превращается в композиционный материал.

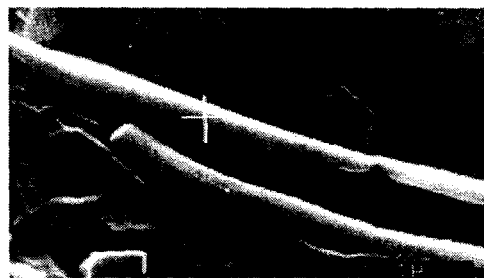


Рис. 1. Сталь углеродистая (0,4 5 % C), упрочненная частицами NbB в режиме сверхглубокого проникания

На рис. 1 показана углеродистая сталь, армированная путем динамического легирования частицами NbB.

Экспериментально установлено, что в зоне каналообразования происходит скачкообразное повышение уровня давления. За счет кумуляции энергии макроудара в узких канальных зонах в сталях минимальный уровень давления составляет 12 ГПа. Об этом свидетельствуют наблюдаемые в сталях переходы: $\gamma \rightarrow \alpha$, для которого минимальный уровень давления – 8 ГПа и $\alpha \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ с уровнем давления 12 ГПа [2].

В условиях реализации этого физического явления плотность энергии резко возрастает, ее величина может значительно превышать 10^9 Дж/м³ [3].

Очевидно, в зонах динамической перестройки материала преграды устойчиво реализуется сверхпластичное состояние при наложении интенсивной деформации.

С учетом энергетики такого процесса становится понятным падение сопротивления введению упрочняющего легирующего материала и электромагнитное излучение, включая его жесткую составляющую.

В данном случае является особенно важным то, что никто не может опровергнуть экспериментальный факт динамического легирования и упрочнения сталей, включая высоколегированные, в заданном объеме на десятки миллиметров глубины.

Упрочнение сталей. Упрочнение сталей осуществляется за счет введения в технологический процесс операций динамического легирования по режиму сверхглубокого проникания. Наиболее простое сочетание включает в себя операции динамического легирования и термическую обработку. Насыщенная по объему частицами порошка сталь хорошо обрабатывается механически до проведения термической обработки. Естественно, за счет дополнительного легирования и локальной перестройки структуры требуется оптимизация режимов термической обработки для получения более высокого уровня физико-механических свойств. Однако, как показывают эксперименты, в первом приближении можно использовать стандартные режимы термической обработки для исходной стали. В зависимости от режимов нагружения и вводимого порошкового состава износостойкость инструментальной стали с 6 % W и 5 % Mo можно увеличить в 1,5...2 раза. Испытания износостойкости образцов из инструментальной стали (6 % W, 5 % Mo), обработанной различными порошковыми составами, проводились в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины. Максимальное повышение износостойкости (в 2 раза относительно уровня необработанной стали) наблюдалось при обработке составами: диборид титана, электрокорунд + карбид + кремния + никель, электрокорунд + никель, карбонитрид титана + никель. Значительно меньшее повышение износостойкости (в 1,1...1,2 раза) наблюдалось при обработке составами: вольфрам + титан, карбид титана + никель, вольфрам + окись алюминия.

Изменяя соответственно режимы термической обработки, можно существенно менять уровень ударной вязкости, предел прочности на изгиб.

Спецификой технологии динамического легирования сталей является то, что она эффективно сочетается с другими известными вариантами термомеханического воздействия, например, с горячим гидростатическим выдавливанием (ГГВД), магнитной обработкой (МО), высокотемпературной металлообработкой (ВТМО). Результаты такого комплексного воздействия приведены в табл. 1, 2.

Специфической особенностью динамического легирования является возможность повышения коэффициента теплопроводности на 8...22 % за счет изменений микроструктуры в локальных зонах инструментальной стали. Длительная последующая термическая обработка приводит к уровню значений, характерных для неупрочненных сталей. Однако выявлено, что в процессе последующей термообработки на основе групп канальных образований возникают линейно ориентированные цепочки карбидов. В результате удается получать материал, имеющий анизотропию физико-механических свойств в различных зонах заготовки.

Геометрию упрочняемой зоны можно задавать геометрией сгустка. Например, задавая диаметр сгустка 50 мм, можно формировать в объеме цельнометаллического стального тела упрочненные зоны диаметром 50 мм и глубиной до 200 мм.

Таблица 1
Влияние воздействия динамического легирования и термомеханической обработки на свойства инструментальной стали (9 % W, 5 % Co)

Вариант обработки	Степень обжатия	Предел прочности при изгибе МПа (кгс/см ²)	Ударная вязкость, Дж/м ² (кгс/см ²)	Твердость HRC
Закалка + отпуск	—	2610 (261)	2100 (2,1)	65
Динамическое легирование + закалка + отпуск	—	2890 (289)	2200 (2,2)	64,5
ГГДВ + отжиг + закалка + отпуск	0,78	3120 (312)	2900 (2,9)	65
	0,86	3280 (328)	2800 (2,8)	65
ГГДВ + отпуск + динамическое легирование + закалка + отпуск	0,78	3310 (331)	2700 (2,7)	64,5
	0,86	3400 (340)	2900 (2,9)	65,5
Динамическое легирование + ВТМО + отпуск	0,78	3640 (364)	3100 (3,1)	65
	0,86	3780 (378)	3100 (3,1)	66

Таблица 2
Влияние магнитного поля и пластической деформации на свойства инструментальной стали (9 % W, 4 % Mo, 8 % Co)

Вариант обработки	Степень деформации	Напряженность магнитного поля Н, А/м	Предел прочности при изгибе МПа (кгс/см ²)	Ударная вязкость, Дж/м ² (кгс/см ²)	Твердость HRC
Закалка + отпуск	—	—	2024 (202,4)	1160(1,16)	66
ГГДВ + отжиг + закалка + отпуск	0,78	—	2497 (249,7)	1430(1,43)	67
	0,86	—	2536 (253,6)	1530 (1,53)	66,9
Закалка + МО + отпуск	—	63	2080 (208)	1130 (1,13)	67
		126	2146 (214,6)	1070 (1,07)	67
ГГДВ + отпуск + закалка + МО + отпуск	0,78 0,86	63	2210 (221)	1370 (1,37)	65,8
		126	2270 (227)	1520 (1,52)	67
		63	2887 (288,7)	1700 (1,7)	67
		126	2834 (283,4)	1670 (1,67)	67,1
Динамическое легирование + термомеханическая обработка + МО + отпуск	0,78 0,86	63	2610 (261)	1800 (1,8)	65
		126	2540 (254)	1800 (1,8)	64
		63	2940 (294)	2000 (2,0)	66
		126	2980 (298)	2000 (2,0)	66

Технологические возможности упрочнения штампового инструмента. Высокая стоимость и низкая стойкость, большие габариты и значительная потребность в штамповом инструменте постоянно требуют разработки рациональных технологий изготовления и упрочнения оснастки. Технологические возможности динамического легирования материалов для штампового инструмента энергоемкого оборудования, малыми трудозатратами и возможностью локального упрочнения отдельных работающих в наиболее сложных условиях эксплуатации, частей штампа.

При выборе параметров динамического легирования предполагается сходная структура заготовки оснастки. Учитывая реальные глубины перестроенных зон, целесообразно формирование рельефа штампа производить после динамического легирования заготовки. В связи с сохранением хорошей обрабатываемости это не вызовет дополнительного расхода инструмента. Конечно, после окончательной термической обработки, например по стандартному для стали режиму, возможны только доводочные операции.

Дополнительные технологические возможности, кроме задаваемой геометрии упрочненных зон, имеются также в такой традиционной области упрочнения оснастки, как химико-термическая обработка. Если в состав частиц ввести порошки материалов, используемых в качестве катализатора процесса диффузии упрочняющих элементов, то процесс диффузии в канальных зонах избирательно ускоряется.

Диффузионный упрочняющий слой оказывается состоящим из сотен или тысяч (на квадратный миллиметр) зон, перпендикулярных к поверхности и зажатых между слоями исходного материала. Подобный подход исключает возможность отслаивания поверхностного упрочненного слоя даже при достижении толщин больших, чем критические.

Полученные необычные научные и технологические результаты были использованы для упрочнения оснастки буровых установок, дробления горных пород и металлорежущего инструмента (рис. 2).



Рис. 2. Различные виды инструмента, упрочненные методом динамического легирования:
а – сухари для ключей буровых установок; б – шарошки для дробления пород

Горнорезущий инструмент на основе упрочненной по объему стали, показал эксплуатационную стойкость в 1,4...1,5 раз выше, чем у твердосплавного. Благодаря высокой скорости динамической перестройки структуры стали (сотни микросекунд), высокой производительности этой технологической операции такая технология может эффективно использоваться для упрочнения штамповой оснастки.

Эксперименты, выполненные со штамповыми сталями X12M, показали, что использование при взрывном легировании материалов, активирующих процесс последующего азотирования, позволяет сформировать упрочненные азотированные слои толщиной 0,12 мм. Конструкция упрочненного слоя качественно отличается от получаемого обычным азотированием, так как поверхностный азотированный слой с увеличением глубины реализуется в продольные узкие зоны вдоль канальных структур сверхглубокого проникания. Такое упрочнение существенно (до 2-х раз) повышает устойчивость к ударным нагрузкам и общую износостойкость в 1,5...1,8 раза (на глубинах до 1 мм).

Заключение. Особенностью создания инструментальных композиционных материалов, предназначенных для изготовления штамповой оснастки, является формирование макрообъемов металла с различным уровнем физико-механических свойств.

Эффективным технологическим подходом в этом направлении может стать использование нового физического явления – сверхглубокого проникания сгустка микрочастиц в объем металлического твердого тела, формирование композиционного инструментального материала в цельнометаллической заготовке.

Специфическое взаимодействие между потоком микрочастиц и стальной матрицей в процессе взрывного легирования позволяет провести объемную перестройку структуры инструментальной стали и сформировать новый композиционный материал.

Благодаря тому, что в условиях сверхглубокого проникания сопротивление введению легирующих упрочняющих веществ уменьшается на несколько порядков, структурная перестройка инструментальных сталей происходит на глубину до 100...200 мм в течение долей секунды.

Сочетание новых и известных технологических операций позволяет получить композиционный материал с уровнем физико-механических свойств в 1,5...1,8 раза выше, чем у исходной высоколегированной стали, и ожидать увеличения эксплуатационной стойкости штамповой оснастки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. – Мн.: НИИ ИП с ОП, 1998. – 210 с.
2. Структурные изменения в железоникелевых сплавах, вызванные действием высокоскоростного потока порошковых частиц-1-Эффекты ударноволнового нагружения / В.И.Зельдович, С.М. Ушеренко и др. // Физика металлов и металловедение. – 2001. – Т. 91, № 6. – С. 72 – 79.
3. Usherenko S., Owsik I., Zarwalsko A. Analysis of shock interaction under the super deep penetration effect. / Fundamental Issues and Applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. Published by Elsevier science Ltd. 2001. – P. 571 – 574.