

С целью установления влияния воздействия ВЧ плазмы на свойства поверхности, проведена обработка различных металлов и их сплавов. Необходимость плазменной модификации перечисленных материалов вызвана потребностями развития науки и техники, связанными с переходом на качественно новый уровень управления свойствами изделий за счет создания и модификации нанослоев [1]. Известно, что традиционные процессы полировки создают на поверхности дефектный слой, что может привести к ухудшению усталостных и прочностных свойств изделий. В связи с этим проведены сравнительные исследования физических свойств поверхности конструкционных материалов до и после процесса ВЧ плазменной полировки и нанополировки. Для комплексной оценки влияния ВЧ плазменной струи на эксплуатационные свойства изделий из металлов проводился фрактографический анализ изломов образцов после усталостных испытаний. Установлено, что разрушение начинается с широкой грани поперечного сечения образца. Усталостные очаги разрушения для неупрочненных образцов располагаются с двух противоположных сторон. После упрочнения методом поверхностной пластической деформации и плазменной обработкой у изделий разрушение начинается с одной стороны (рис.1 – 2). Строение изломов образцов характерно для усталостного разрушения. Очаги усталости обозначены радиально расходящимися элементами структуры.

а б

Рис. 1 - Внешний вид излома образца после шлифовки, полировки (а) и ВЧИ плазменной обработки (б) ( $P_p = 2,8$  кВт,  $G_g = 0,08$  г/с,  $t_{обр} = 300$  с) = 550 МПа, 12 а б

Рис. 2 - Внешний вид излома образца в усталостной зоне после шлифовки, полировки и ВЧ плазменной обработки, 12

Установлены режимы плазменной обработки, при которых остаточные напряжения в поверхностном слое являются сжимающими. На рис. 3 представлены эпюры остаточных напряжений образцов с плазменным воздействием в сравнении с изделиями, подвергнутыми ручной полировке, а также поверхностному пластическому деформированию. Рис. 3 - Эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое металла после различных видов обработки: 1 - ручная полировка; 2 - гидродробеструйная обработка и виброгалтовка; 3 - обработка ВЧ плазмой аргона в режиме  $W_i = 63$  эВ,  $j_i = 1,5$  А/м<sup>2</sup>

Видно, что после упрочнения в потоке ВЧППД в поверхностном слое образуются сжимающие остаточные напряжения от 50 до 650 МПа. В зависимости от режима плазменной обработки имеется подслойный максимум 350 ... 800 МПа на глубине до 20 мкм с изменением знака на глубине 140 ... 270 мкм. Эпюры остаточных напряжений после упрочнения методом поверхностной пластической деформацией и струей ВЧЕ разряда более плавные, чем после ручной полировки. До глубины 40...80 мкм величина сжимающих остаточных напряжений снижается в меньшей степени, чем у полированных образцов без упрочнения. Максимальные значения остаточных напряжений у образцов после плазменного воздействия залегают ближе к поверхности, чем после упрочнения поверхностным пластическим деформированием, и их распределение по глубине

более плавное. Кроме того, изменение знака остаточных напряжений у этих образцов происходит на большей глубине. В результате ионной бомбардировки и термического воздействия плазмы на изделия устанавливается температура 150 – 400°С в зависимости от вида металла. В основном на поверхности происходит локальное оплавление микровыступов, приводящее к залечиванию микропор и микротрещин, и удаление примесных дефектов. Это подтверждается фотографиями поверхности, полученными с помощью электронного микроскопа, а также данными оже-спектроскопии. Поэтому в указанных режимах обнаружены внедренные на глубину до 20 нм атомы аргона, что способствует искажению кристаллической решетки и создает наклеп в поверхностном слое. Результаты металлографических исследований показали, что глубина модифицированного ВЧ плазмой слоя составляет 20-30 мкм. Прочность образцов с плазменной обработкой близка к прочности образцов после поверхностно-пластического деформирования. Как показано в [2, 3], частицы инертного плазмообразующего газа проникают в приповерхностный слой металла на глубину до 100 нм. Однако свойства обрабатываемых материалов модифицируются также и в более глубоко лежащих слоях материала, что проявляется в изменении физико-механических и эксплуатационных характеристиках образцов. Исследовалась зависимость результатов ВЧ плазменной модификации поверхности материалов от входных параметров плазмотрона (расход плазмообразующего газа, давление, мощность разряда), основных параметров обработки – энергии ионов и плотности ионного тока на поверхность образца. Физико-механические свойства поверхностных слоев зависят от параметров кристаллической решетки [4]. Металлографические исследования показали, что общая глубина модифицированного слоя составляет 0,02 – 0,03 мм. Результаты измерения микротвердости  $H_m$  образцов металлов с различной предварительной обработкой поверхности (шлифовка, полировка, поверхностное пластическое деформирование) показывают увеличение ее не более, чем на 10%. Так, у меди  $H_m$  увеличивалась с 588 до 650 МПа, у стали 30 – с 1127 до 1240 МПа, у титанового сплава ВТ-9 – с 3136 до 3500 МПа. На рис. 6 представлены зависимости относительного изменения предела выносливости деталей из сплава ВТ9. а) б) Рис. 4 - Зависимость относительного изменения предела выносливости деталей из сплава ВТ9 от энергии ионов (а) и плотности ионного тока на поверхность образца (б) при обработке в потоке ВЧ плазмы аргона. Как видно из рис. 6, увеличение усталостной прочности, характеризующейся повышением предела выносливости и долговечности, происходит при  $j_i = 5 - 13 \text{ А/м}^2$ ,  $W_i = 30 - 50 \text{ эВ}$ . Это соответствует обработке в струе ВЧ плазмы пониженного давления. Кривые носят немонотонный характер. При малых значениях  $j_i$  и  $W_i$  происходит незначительная термообработка, что приводит, например на сталях типа X13, к низкотемпературному отпуску. При высоких значениях  $j_i$  и  $W_i$  происходит

интенсивная термообработка с рекристаллизационными процессами. Продолжительность обработки с целью достижения наибольшего повышения предела выносливости (на 5 – 35%) составляет 8 – 9 минут (рис. 7). Рис. 5 - Обобщенная зависимость относительного изменения предела выносливости металлов от продолжительности обработки в оптимальном режиме ВЧЕ плазмой аргона. Исследования угла загиба (динамический и статический углы) показали, что результаты обработки образцов, с точки зрения охрупчивания материала, достаточно критичны к режиму плазменной обработки. В оптимальных режимах значения угла загиба те же, что и после поверхностного пластического деформирования. Зависимости изменения предела выносливости от основных обобщенных параметров обработки аналогичны зависимостям остаточных напряжений. При тех значениях  $j_i$  и  $W_i$ , при которых происходит наибольшее увеличение сжимающих остаточных напряжений, наблюдается максимальное повышение предела выносливости. Как видно из рис. 7, продолжительность обработки с целью достижения  $\sigma_{-1max}$  составляет 8 – 9 мин. При малых значениях  $j_i$  и  $W_i$  плазменное воздействие, как следует из физической модели, практически не приводит к изменению остаточных напряжений в поверхностном слое. При больших значениях  $j_i$  и  $W_i$  происходит перегрев поверхности и, как следствие, снятие остаточных напряжений. Исследование влияния скорости охлаждения образцов после плазменного воздействия на предел выносливости показало, что обдув холодным аргоном дополнительно повышает усталостную прочность. В результате исследований разработаны процессы плазменного упрочнения, заключающиеся в том, что на изделие воздействуют потоком ВЧ плазмы аргона со следующими входными характеристиками: скорость потока 100 – 500 м/с, давление 75 – 200 Па, концентрация электронов  $10^{18} - 10^{19}$  1/м<sup>3</sup>, при этом  $W_i = 30 - 50$  эВ,  $j_i = 5 - 15$  А/м<sup>2</sup>. С целью повышения эффективности обработки плазменную струю направляют так, чтобы ось потока проходила через центр зоны наиболее вероятного возникновения усталостных трещин в изделии. После окончания обработки поверхность обдувают потоком аргона. Результаты исследований показывают, что плазменное воздействие в определенных режимах позволяет повышать усталостную прочность с одновременным наведением в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений и уменьшением параметра шероховатости в 2 раза, с  $Ra=1,25-0,8$  мкм до  $Ra=0,63-0,32$  мкм. Данный способ более производителен, чем применяемый в настоящее время метод поверхностного пластического деформирования, экологически чистый, позволяет не только сохранить полученный после полировки класс шероховатости, но и увеличить его. При этом не изменяются существенно состав и структура поверхностных нанослоев. Процесс позволяет регулировать характеристики поверхностного слоя в широких пределах. Так, например, если необходимо уменьшить параметр шероховатости более чем в 2 раза, то этого можно достигнуть за счет

некоторого уменьшения усталостной прочности. В традиционных методах упрочнения такая гибкость процесса невозможна. Это связано с принципиально разной физической сутью протекающих процессов, ответственных за повышение усталостной прочности. Исходя из физической модели взаимодействия ВЧ плазмы с поверхностями твердых тел, при значениях основных параметров обработки  $W_i = 30 - 50$  эВ,  $j_i = 0,5 - 1,5$  А/м<sup>2</sup> основной вклад в модификацию поверхностного слоя вносит передача поверхностным атомам кинетической энергии ионов, ускоренных в слое положительного заряда. Рекомбинация ионов при этом играет значительно меньшую роль. Передача энергии рекомбинации ионов поверхностным атомам образца, в случае плазменной полировки, приводит к уменьшению параметра шероховатости, но не более чем в 2 раза. Интенсивная бомбардировка поверхности ионами низкой энергии приводит к ускоренной диффузии дефектов наноструктуры в более глубокие слои материала. Результатом этого является модификация физических свойств материала в слоях микронной толщины, что приводит к изменению эксплуатационных характеристик изделий машиностроения. Величина упрочнения, получаемая при воздействии ВЧ плазмы, более высокая, чем достигаемая при использовании традиционных методов. При значениях  $j_i = 5 - 15$  А/м<sup>2</sup> происходит взаимодействие с поверхностью значительно большего числа ионов в единицу времени, чем при плазменной полировке ( $j_i = 0,5 - 3$  А/м<sup>2</sup>). Это приводит к тому, что кристаллическая решетка твердого тела непрерывно получает порции дополнительной энергии и в металлах с внедренными атомами плазмообразующего газа происходит дефектообразование. При этом дефекты, например дислокации, распространяются в глубь твердого тела за счет передачи энергии атомов и ионов плазмы поверхностному слою. Полученная атомами твердого тела энергия достаточна для нарушения связей в кристаллической решетке (выше энергии связи). За счет этого происходят процессы разупорядочения структуры и развития дефектов, которые ведут к перераспределению остаточных напряжений на значительной глубине (рис. 5). Таким образом, вследствие модификации нанослоя, перераспределения на глубине до 200 мкм сжимающих напряжений, усталостная прочность возрастает на 25 - 30% по сравнению с образцами, упрочненными традиционным методом - гидродробеструйной обработкой и виброгалтовкой. Найденные режимы реализуются в струях ВЧ плазмы пониженного давления. При этом расход плазмообразующего газа аргона находится в пределах от 0,06 до 0,1 г/с,  $p = 75 - 200$  Па,  $P_p$  изменяется от 2,2 до 3 кВт.