

УДК 621. 002: 539. 3 (075.8)

КЛАССИФИКАЦИЯ И ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В.А. ЛЕБЕДЕВ

(Донской государственный технический университет)

Представлена классификация динамических методов поверхностного пластического деформирования, раскрыта с позиций энергетического подхода физическая сущность механизма упрочнения деталей этими методами и обоснована предпочтительная область их технологического назначения.

Ключевые слова: *поверхностно-пластическое деформирование, упрочнение, индентор, поверхностный слой.*

Введение. Любой метод поверхностного пластического деформирования (ППД), осуществляемый в рамках технологического маршрута изготовления детали, предназначен выполнить необходимые действия над заготовкой для получения детали требуемого по условиям эксплуатации качества. Для разработки с единых теоретических позиций обобщенной методики проектирования технологий упрочнения динамическими методами ППД, основанной на структурно-энергетическом подходе, в качестве исходной предпосылки могут быть приняты классификация и физико-технологические аспекты этих методов, изложенные в статье.

Классификация динамических методов. Операции обработки динамическими методами ППД включают в технологический процесс в основном для упрочнения детали с целью обеспечения максимального приращения предела выносливости, износостойкости и других эксплуатационных свойств. В процессе ППД динамическими методами это достигается путем изменения ряда параметров качества поверхности и свойств материала поверхностного слоя, а именно:

- формируется качественно новая макро- и микрогеометрия поверхностного слоя;
- в поверхностном слое возникают остаточные макронапряжения, являющиеся следствием упругопластических искажений кристаллической решетки материала;
- структура поверхностного слоя приобретает моногенный текстурированный характер из-за изменения формы, размеров и ориентировки зерен.

Обработка деталей динамическими методами ППД позволяет:

- повысить сопротивление пластической деформации при циклических эксплуатационных нагрузках;
- повысить предел прочности и текучести, твердости и микротвердости поверхности;
- снизить характеристики пластичности.

Следует отметить, что эффективность упрочнения тесно связана с интенсивностью упругопластической деформации материала в процессе ППД.

Известно, что по характеру энергетического воздействия на обрабатываемую поверхность инденторов инструмента или энергонесущей обрабатывающей среды все методы обработки ППД подразделяются на два класса: квазистатические и динамические [1–3]. В первом случае процесс протекает в условиях непрерывного контакта индентора инструмента с обрабатываемой поверхностью при постоянных, как правило, значениях деформирующей нагрузки (силы). Во втором случае пластическая деформация поверхностного слоя осуществляется путем многократного ударно-импульсного воздействия инденторов инструмента или энергонесущей обрабатывающей среды на обрабатываемую поверхность. При этом инденторы энергонесущей обрабатывающей среды или многократно воздействуют на всю обрабатываемую поверхность с изменяющимся усилием деформации от нуля до максимального значения, или, если процесс ППД носит локальный характер, очаг деформации последовательно с определенным шагом проходит обрабатываемую поверхность.

В качестве основополагающих признаков, предопределяющих физическую сущность процесса деформирования, и, как следствие, упрочнение поверхностного слоя динамическими методами ППД, можно выделить:

- вид инденторов инструмента или энергонесущей обрабатывающей среды, используемых для реализации процесса ППД;
- кинетические особенности взаимодействия инденторов инструмента или энергонесущей обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью и их связь с источником энергии;
- характер энергетического поля (потока), обеспечивающего динамическое состояние инденторов энергонесущей обрабатывающей среды в процессе обработки;
- траектория движения энергонесущей обрабатывающей среды в энергетическом поле;
- вид источника энергии технологической системы, в условиях которой реализуется метод ППД.

На основе вышеприведенных признаков динамические методы ППД можно сгруппировать следующим образом.

По количеству инденторов, одновременно воздействующих на обрабатываемую поверхность в процессе ее обработки, и их кинематической связи с источником энергии динамические методы ППД делятся на две основные группы (рис. 1):

- группа одноконтактных методов, реализующих процесс ППД единичным индентором, имеющим полужесткую связь с источником энергии;
- группа многоконтактных методов, осуществляющих обработку поверхности потоком свободнодвижущихся инденторов в условиях энергетического поля (потока), формируемого источником энергии.

Механизм упругопластической деформации поверхностного слоя при обработке динамическими методами ППД и, как следствие, качество сформированного в процессе обработки поверхностного слоя зависит от первоначальной природы энергонесущей обрабатывающей среды или индентора инструмента.

В качестве энергонесущих обрабатывающих инденторов в технологии обработки одноконтактными динамическими методами ППД используют твердое металлическое тело, как правило, сферической формы (шарики). При обработке многоконтактными методами основу энергонесущей обрабатывающей среды составляют или твердые кристаллические тела в виде шариков, дроби или вещества различной физической природы (газ, жидкость, металлическая смесь).

На рис. 2 представлены свойственные динамическим методам ППД схемы взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью, из которых видно, что механизм упругопластической деформации поверхности определяется размерами инденторов и геометрическими характеристиками шероховатости поверхности, получаемой на предшествующей ППД операции.

Критериальным соотношением, позволяющим оценить присущий процессу ППД динамическими методами механизм упругопластической деформации, является соотношение

$$\vartheta = \frac{d_u}{S_n}, \quad (1)$$

где d_u – диаметр индентора инструмента или энергонесущей обрабатывающей среды; S_n – среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины.

Из этого соотношения следует, что если $\vartheta > 1$ (см. рис. 2,а), то процесс ППД будет характеризоваться изменением характеристик микропрофиля поверхности и ее упрочнением. При $\vartheta < 1$ (см. рис. 2,б) процесс ППД будет обеспечиваться только упрочнением поверхности, не оказывая существенного влияния на изменение характеристик микропрофиля, сформированного на предшествующей ППД операции.

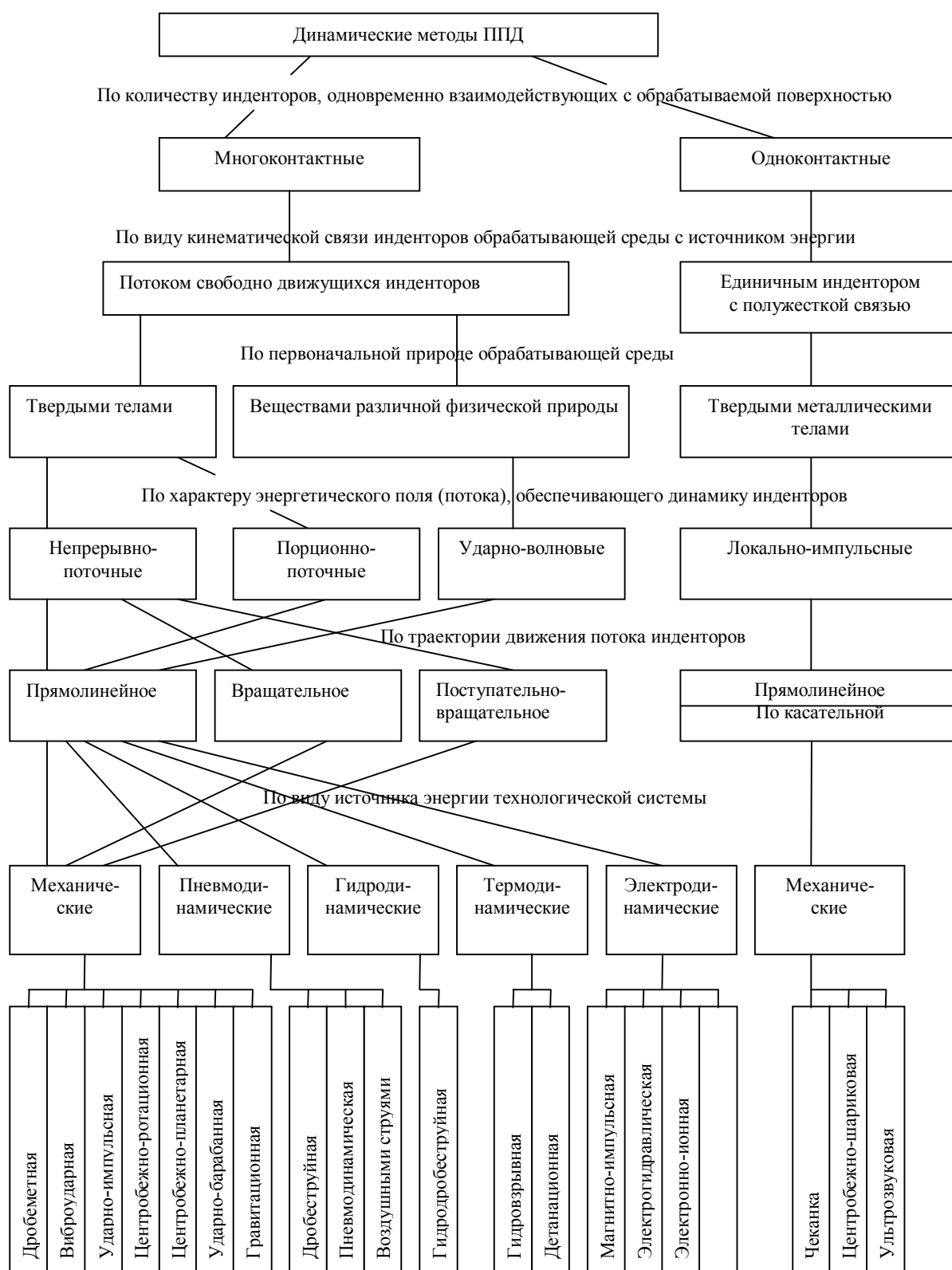


Рис. 1. Классификация динамических методов поверхностного пластического деформирования

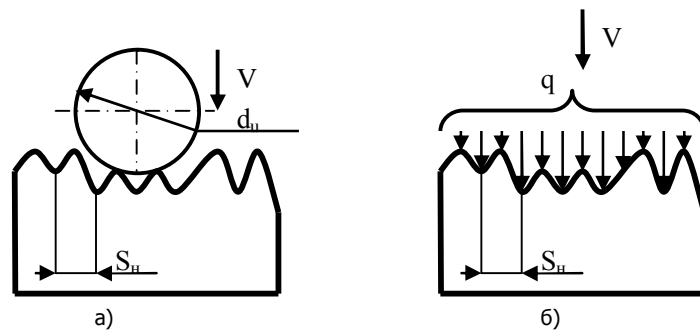


Рис. 2. Схемы уругопластической деформации поверхности динамическими методами ППД:
а – твердыми телами; б – веществами (смесями)

Кроме того, данное соотношение, приемлемое больше к многоконтактным динамическим методам ППД, позволяет обосновать вид энергонесущей обрабатывающей среды исходя из энергетических возможностей технологической системы, реализующей конкретный метод ППД, технологического обеспечения требуемого качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей.

Широкое практическое применение многоконтактных динамических методов ППД для упрочнения деталей, как было отмечено ранее, потоками свободнодвижущихся инденторов, обусловлено их высокой эффективностью, универсальностью, приемлемостью для разнообразной по форме и размерам номенклатуры изделий, гибкостью процессов ППД. Кроме того, проведенный анализ технических и технологических систем их реализации, общность механизмов уругопластической деформации позволяет рассматривать их физико-технологическую сущность с единых методологических позиций.

Такой подход дает возможность, с одной стороны, выявить особенности методов ППД, определить рациональные области их применения, а также осуществить их выбор на этапе технологической подготовки производства.

Как видно из классификации, представленной на рис. 1, в основе многообразия динамических методов ППД лежит источник энергии и характер энергетического поля или потока, обеспечивающего динамику инденторов обрабатывающей среды.

По виду источника энергии выделяют следующие технологические системы динамических методов ППД:

- механические – энергетическое состояние обрабатывающей среды обеспечивается посредством специальных устройств с механическими прерывателями, виброударных устройств, вибрационных камер и площадок, центробежно-ротационных устройств, ультразвуковых, роторных систем, ударно-импульсных устройств, барабанных камер, центробежно-планетарных и устройств элеваторного типа;

- пневмодинамические – использующие в качестве источника энергии сжатый воздух, подаваемый вместе с инденторами энергонесущей обрабатывающей среды через воздушную форсунку, который и сопровождает их до обрабатываемой детали;

- гидродинамические – позволяют энергетическое состояние инденторов обрабатывающей среды обеспечить путем их эжектирования смазывающе-охлаждающей жидкостью;

- термодинамические – в которых основным источником энергии являются взрывчатые вещества (ВВ) (газовая смесь, порошок). Ударно-импульсное давление, образующееся при взрыве заряда ВВ, передается на обрабатываемую деталь непосредственно через энергонесущую обрабатывающую среду в виде жидкости, сыпучих, вязких или твердых тел;

- электродинамические – источником энергии, обеспечивающим ударно-импульсное упрочнение поверхности энергонесущей средой является или высоковольтный электрический разряд, создаваемый между электродами, помещаемыми в энергонесущую обрабатывающую среду

(жидкость), или импульсные магнитные поля, создаваемые посредством специально разработанных для этой цели индукторов.

Кинетика воздействия энергонесущей обрабатывающей среды на обрабатываемую поверхность, обуславливающая эффект ее упрочнения, зависит от динамических характеристик энергетического поля, формируемого в соответствующей методу ППД технологической системе.

Для одноконтантных методов ППД это, как правило, локально-импульсное силовое поле, создаваемое или единичным индентором с определенной частотой, или совокупностью инденторов, последовательно воздействующих на локальный участок и формирующих очаг деформации. Для многоконтантных методов ППД свободнодвижущиеся инденторы энергонесущей обрабатывающей среды под воздействием энергетического силового поля образуют концентрированный поток определенной плотности, перемещающийся с определенной скоростью в направлении преграды, в качестве которой выступает участок обрабатываемой поверхности. Характер перемещения определяется источником энергии и может быть непрерывно-поточным, порционно-поточным, ударно-волновым.

Под плотностью потока понимается число инденторов энергонесущей обрабатывающей среды, соударяющихся в единицу времени с единичной площадкой поверхности, перпендикулярной направлению движения потока.

Для оценки плотности потока можно использовать соотношение

$$J_0 = \frac{1}{F_p}, \quad (2)$$

где F_p – средняя площадь, образованная линиями, соединяющими центры рассредоточения соседних трех или четырех пластических отпечатков на поверхности по сечению потока, контактирующего с поверхностью (устанавливается экспериментально).

В совокупности площадь потока энергонесущей обрабатывающей среды и скорость инденторов, обеспечиваемые энергетическим потоком (полем), определяют интенсивность процесса упрочнения и производительность обработки динамическими методами ППД.

Кроме того, интенсивность и производительность упрочнения деталей динамическими методами ППД связана с особенностями энергетического потока (поля), в условиях которого обеспечиваются динамические характеристики обрабатывающей среды. Эта особенность обусловлена траекторией движения обрабатывающей среды в процессе обработки. Как правило, для большинства динамических методов ППД характерна поступательно-прямолинейная траектория движения как отдельных инденторов, так и всего потока энергонесущей обрабатывающей среды в целом. Вместе с тем ряд механических технологических систем, основанных на использовании в качестве источника энергии механических колебаний, и вращение рабочих камер позволяют обеспечить вращательное, поступательно-вращательное движение потока энергонесущей обрабатывающей среды.

Кинетическая сущность процесса ППД. В качестве основных технологических предпосылок, обусловивших многообразие динамических методов ППД, можно выделить следующие:

- необходимость создания наиболее эффективных как с точки зрения интенсивности и производительности, так технико-экономических соображений процессов ППД, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств деталей;
- изыскание наиболее универсальных методов, а также наиболее приемлемых методов, позволяющих осуществлять упрочнение различных по прочности и жесткости деталей, а также сложных и трудоемких поверхностей;
- необходимость повышения эксплуатационных свойств деталей из высокопрочных труднообрабатываемых материалов.

Методы ППД имеют единый, обусловленный динамическим характером силового воздействия инденторов механизм упрочнения поверхностного слоя, определяющий физико-механические свойства поверхностного слоя, сущность которого заключается в следующем.

В соответствии с дислокационными представлениями процесс пластической деформации связан с генерированием (зарождением), движением и уничтожением в деформируемых объемах материала различного рода элементарных дефектов (вакансий атомов внедрения, дислокаций, свободных радикалов и др.) и их скоплений, а также субмикроскопических нарушений сплошности (пор, трещин) [2–3].

Теорией дислокаций предложена целая иерархия различных дислокационных дефектов и повреждений, которые с микроскопической точки зрения могут быть разделены на две группы: элементарные и сложные. У элементарных дефектов энергия активации образования (зарождения) имеет наиболее низкие значения, поэтому они характеризуются высокими концентрациями и скоростями зарождения и движения. К элементарным дефектам относятся вакансии, внедренные атомы, дислокационные сегменты. Все остальные дефекты представляют собой сложные, так как являются производными от элементарных дефектов в результате их скопления. Сложные дефекты служат источниками и стоками элементарных дефектов, а также препятствиями для их движения.

Любой процесс деформирования и разрушения, а значит и процесс ППД, является кинетическим и необратимым процессом независимо от физико-химической природы материала, его структуры, а также условий нагружения.

Представления процесса ППД как кинетического вытекает также из двух экспериментально установленных фактов, из которых первый свидетельствует о его статистическом характере, второй – раскрывает его феноменологическую сторону [3]. В основе феноменологии процесса лежит зависимость упрочнения элемента поверхностного слоя от силовых параметров нагружения и времени (циклов) их воздействия (рис. 3), из которой следует, что если два процесса ППД, сопровождающихся упрочнением, а следовательно, внутренней повреждаемостью элемента поверхности, протекают как при более высоких внешних силовых параметрах нагружения, так и при более низких, то разница в поведении деформируемого элемента поверхностного слоя будет зависеть только от интенсивности повреждаемости.

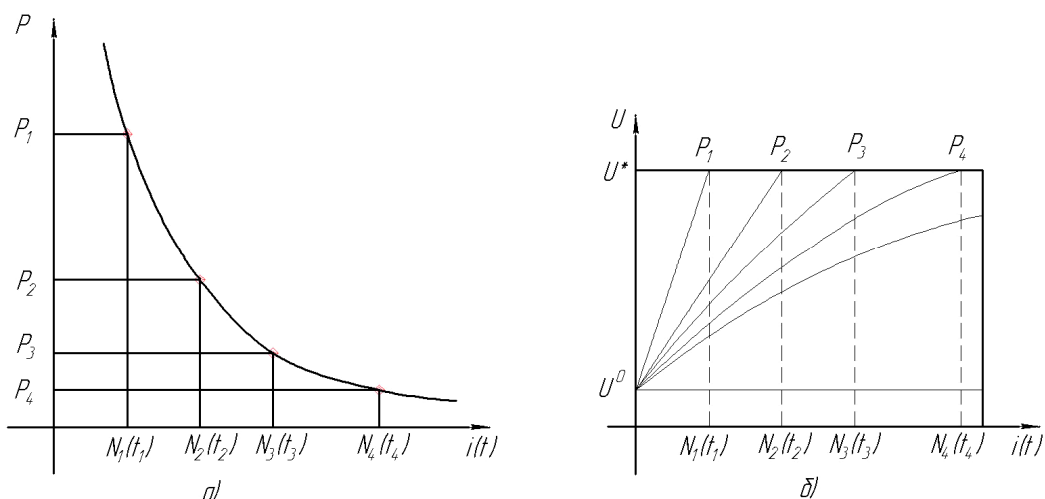


Рис. 3. Кинетика процесса ППД

Статистически процесс ППД выглядит следующим образом. В каждый момент времени (цикл) деформирования элемента поверхностного слоя заданным условиям нагружения соответ-

ствует определенная степень его повреждаемости. Как только повреждаемость материала в локальном микрообъеме достигает предельной (критической) величины, начинается процесс его разрушения в виде микро- и макронарушений.

Подтверждением этого являются результаты экспериментальных исследований влияния продолжительности ППД на усталостную прочность и износостойкость образцов, которые показали, что с появлением в поверхностном слое признаков разрушения (микротрещины) эксплуатационные показатели образцов начинают снижаться. Это позволило сделать вывод, что наибольший эффект упрочнения ППД достигается за промежуток времени или количество циклов нагружения, при котором в элементах поверхностного слоя накапливается критическая (предельная) поврежденность. Изложенные выше представления и закономерности процесса ППД могут быть описаны и проиллюстрированы следующим образом. Обозначим через U количественную меру поврежденности элемента поверхностного слоя в процессе ППД, через u – степень поврежденности, а через $U^0 = \frac{du}{dt}$ – интенсивность повреждаемости. Тогда при любой величине усилия внешнего силового нагружения поврежденность элемента поверхностного слоя будет изменяться с интенсивностью, которая в общем случае будет являться функцией силового параметра деформирования P , температуры T и времени t протекания процесса.

Графически это можно представить в виде кинетических кривых (см. рис. 3,б), из которых следует, что по мере деформирования элемента поверхностного слоя его поврежденность увеличивается. Это увеличение происходит до тех пор, пока поврежденность U не достигает критической величины U^* , зависящей от свойств обрабатываемого материала и не зависящей от величины силового нагружения. Последнее обстоятельство обусловлено феноменологичностью процессов деформирования и разрушения материалов. На рис. 3,а представлена зависимость изменения числа циклов нагружения элемента поверхностного слоя i в зависимости от силовых параметров процесса P , при которых достигается его критическая поврежденность. Аналогичные кривые могут быть построены для любого уровня поврежденности $U < U^*$.

Запишем условие предельной поврежденности элемента поверхностного слоя в виде

$$U = U_0 + \int_0^{t^*} U^0 dt = U^* = const, \quad (3)$$

где U_0 – поврежденность элемента поверхностного слоя на стадии обработки, предшествующей ППД; t^* – предельное время ППД, эквивалентное предельному числу циклов внешнего силового нагружения.

Принимая, что поврежденность деформируемых в процессе ППД объемов при каждом цикле носит необратимый характер, а степень упрочнения есть результат накопления (суммирования) поврежденностей, можно сделать вывод, что предельная поврежденность и, как следствие, предельное упрочнение поверхностного слоя произойдет тогда, когда сумма относительных повреждений станет равной 1, т. е.

$$W = \frac{1}{U^*} \int_0^{t^*} U^0(t) dt = 1. \quad (4)$$

Это условие позволяет прогнозировать предельное время ППД, а также число циклов силового нагружения деталей для различных режимов пластической деформации поверхностного слоя, обеспечивающее максимальную степень упрочнения при условии знания зависимости $U^0(P, T, t(i))$.

Для практического применения зависимостей (3), (4) при проектировании операций ППД необходимо:

- выявить параметр U , способный интегрально характеризовать деформационное упрочнение деформируемых в процессе ППД объемов;
- установить аналитические зависимости, описывающие кинетику пластической деформации поверхностного слоя при ППД.

В заключение выделим два основополагающих аспекта, определяющих физико-технологическую сущность динамических методов ППД. Первый заключается в том что, несмотря на многообразие методов, разработанных для реализации этого способа упрочнения, явления, происходящие в поверхностном слое при обработке этими методами, имеют одинаковую физическую сущность.

Второй аспект заключается в том что, эффективность влияния динамических методов ППД на физико-механические и эксплуатационные свойства деталей в большей степени определяется энергетическими и технологическими возможностями, которыми располагает технологическая система, реализующая конкретный метод ППД.

Библиографический список

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Бабичев А.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтakтным виброударным инструментом / А.П. Бабичев [и др.]. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 192 с.
3. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования: науч. издание / В.А. Лебедев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 183 с.

Материал поступил в редакцию 19.04.11.

References

1. Odinczov L.G. Uprochnenie i otdelka detalej poverxnostny`m plasticheskim deformirovaniem / L.G. Odinczov. – M.: Mashinostroyeniye, 1987. – 328 s. – In Russian.
2. Babichev A.P. Otdelochno-uprochnyayushhaya obrabotka detalej mnogokontaktny`m vibroudarny`m instrumentom / A.P. Babichev [i dr.]. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2003. – 192 s. – In Russian.
3. Lebedev V.A. Texnologiya dinamicheskix metodov poverxnostnogo plasticheskogo deformirovaniya: nauch. izdanie / V.A. Lebedev. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2006. – 183 s. – In Russian.

CLASSIFICATION AND PHYSICO-TECHNOLOGICAL ASPECTS OF DYNAMIC METHODS OF SURFACE-PLASTIC DEFORMATION

V.A. LEBEDEV

(Don State Technical University)

The classification of dynamic methods of the surface plastic deformation is described. Physics of the work hardening mechanism by these methods is revealed from the perspective of the energy approach. The preferred area of their technological application is proved.

Keywords: surface plastic deformation, strengthening, indenter, surface layer.