

**Оценка характера повреждаемости образцов  
при физическом моделировании диссипативных процессов  
изнашивания в зацеплении**

Звонарев И.Е., Фокин А.С., Иванов С.Л.

Санкт-Петербургский государственный горный университет

В настоящее время усталостная теория изнашивания получила всеобщее признание. Согласно энергетической теории изнашивания [1], отделение частиц износа происходит в результате накопления в некотором объеме материала поверхностного слоя определенного критического запаса внутренней энергии. При этом в процессе деформации активируются самоорганизующиеся диссипативные процессы, в результате которых перед разрушением в деформируемом материале вместо ожидаемого хаоса и деградациии наблюдаются высокоупорядоченные структуры, т. е. система непрерывно само регулируется, понижая энтропию, образуемую в ходе накопления дефектов.

Объемные и поверхностные усталостные явления тесно связаны между собой, что поддерживается результатами рентгеноструктурных исследований, при которых было показано, что дислокационные субструктуры, формирующиеся при трении, аналогичны тем, которые образуются при объемном деформировании материалов. Впервые на общность закономерностей объемного и поверхностного деформирования, а также фрикционной усталости было указано Й. Кимурой, подтверждено и развито Е.Ф. Непомнящим, А.Л. Жариным, В.В. Федоровым и другими.

В трудах Я.И. Френкеля, С.Н. Журкова и других ученых была показана фундаментальная роль кинетических термофлуктуационных актов, совершаемых на атомарном уровне, во всех химических, физических и механических процессах, происходящих внутри и на поверхности твердых тел. Вопреки ожидаемому растущему хаосу, как показано в работах [2, 3], в материалах, находящихся вдали от равновесия, происходит самоорганизация и эволюция дислокационных диссипативных субструктур, развивающаяся в строгой иерархической последовательности. Соотношения между плотностью дислокаций, механизмом диссипации и видом диссипативных структур, определяющих состояние и свойства материала деформируемого тела соответствуют определенному энергетическому барьеру.

еру и характеризуют устойчивые фазовые переходы. Фазовые переходы осуществляются последовательно и закономерно. При этом каждый вид диссипативных структур распространяется, пока не заполнит весь объем материала. Каждая новая фаза начинает появляться в очагах образования дислокаций, постепенно смещая границу предыдущей фазы.

Понятие о совместном действии колебательного и скачкообразного движения атомов и молекул как элементарном физическом механизме атомно-молекулярных перегруппировок легло в основу современной молекулярно-кинетической теории и термофлуктуационной концепции прочности материалов.

Пространственно-временную локализацию диссипативных структур, обусловленную дискретностью (скачкообразностью) процесса разрушения можно обнаружить при любых кинетических процессах, например, в скачкообразном росте трещины, появлении «зубьев» текучести при пластической деформации, циклическом диспергировании поверхностного слоя при усталостном изнашивании, акустических эффектах, сопровождающих деформацию металлов и др. явлениях. При этом геометрические и временные характеристики диссипативных структур, определяющие кинетику повреждения и разрушения материалов, при неизменных внешних условиях сохраняются достаточно стабильными [1, 4].

На макроуровне в твердом теле происходит усреднение всех дискретных процессов; скачкообразное изменение физико-механических параметров сглаживается и воспринимается как непрерывный процесс. Таким образом, дискретный процесс накопления повреждения создает непрерывный рост внутренней энергии деформируемых материалов. Кинетика изменения накопленной энергии повреждения для сталей была представлена в работах В.В. Федорова, где он показал, что в процессе усталостных испытаний происходит близкий к линейному рост запасенной энергии до некоторого критического значения, при котором происходит разрушение материала. Его эксперименты подтвердили правомерность структурно-энергетической теории прочности, в которой разрушение связывается с достижением внутренней энергией материала критического значения, называемого энергией активации разрушения.

Установлено, что на процесс усталостного изнашивания наибольшее влияние оказывает процесс пластической деформации,

протекающий при трении на вершинах выступов шероховатостей и приводящий к малоцикловому усталостному разрушению поверхностного слоя [1].

В качестве меры накопленной повреждаемости в кинетическом подходе могут рассматриваться приращения: запасенной энергии, плотности дефектов, интенсивности сигналов акустической эмиссии, остаточной намагниченности и других показателей состояния материалов, позволяющих прогнозировать выработанный и остаточный ресурс элементов машин и оборудования, что необходимо для решения задачи управления сроком их службы.

Для выявления характера накопления повреждаемости в образцах имитирующих эти процессы в зубчатом зацеплении был проведен сравнительный эксперимент по разрушению образцов. Для серии опытов была изготовлена серия одинаковых образцов длиной 210 мм из металлической ленты ЛВП – 12х5,5 (рис. 1а) толщиной 0,55 мм.

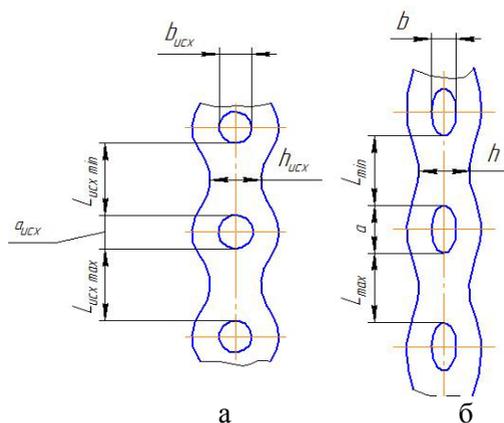


Рис. 1. Геометрические размеры образцов до (а) и после (б) растяжения

Образцы подвергались разрушению растяжением на прессе для статических испытаний Zwick Roell (рис. 1б), а также при циклическом изгибе на маятниковом стенде [4]. Так же лента была подвержена циклическим изгибам до разрушения. Энергия разрушения образцов составила 3,07 и 0,09 Дж соответственно. Разрушенные части образцов были подвергнуты измерениям твердости по всей поверхности на универсальном твердомере Zwick ZHU 187 (рис. 2).

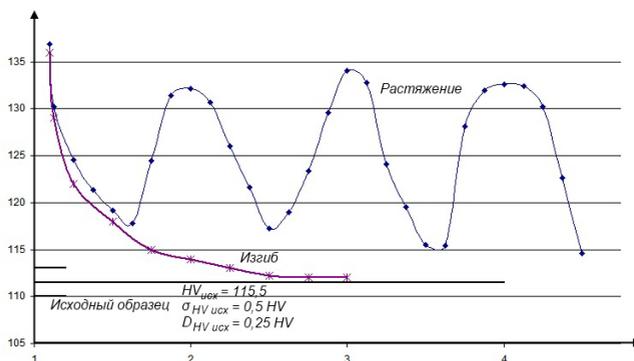


Рис. 2. Изменение твёрдости разрушенных образцов растяжением и изгибом в сравнении с базовым

Увеличение поверхностной твердости образцов объясняется накоплением дислокаций в их кристаллической решетке под воздействием разрушающей нагрузки. При этом твердость в сечении разрушения образцов разрушенных различными способами близки между собой в пределах точности измерений. Вместе с этим, как видно из рисунка характер изменения твердости по длине образцов различен и соответствует способу нагружения последних.

#### Литература

1. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
2. Лихтман В.И. Физико-химическая механика металлов / В.И. Лихтман, Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер. – М.: АН СССР, 1962. – 303 с.
3. Логвинов Л.М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жидкости: Учеб. пособие / Л.М. Логвинов. – М.: ЦНТИ «Поиск», 1992. – 90 с.
4. К вопросу оценки ресурса механических трансмиссий машин энергетическим методом / Фокин А.С., Звонарёв И.Е., Иванов С.Л. // Горное оборудование и электромеханика. - 2011. - №8. – С. 38-41.