

## АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ И ПУТИ РАЗВИТИЯ РАСЧЕТОВ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В ТРАНСМИССИЯХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Г.Д. Драгунов, П.В. Яковлев

## ANALYSIS OF CRITERIA FOR STRENGTH AND WAYS OF DEVELOPMENT PAYMENT GEARS IN TRANSMISSIONS OF TRANSPORT VEHICLES

G.D. Dragunov, P.V. Yakovlev

Рассматриваются существующие подходы к расчету на выносливость деталей трансмиссий транспортных машин. Проведен анализ одно- и двухпараметрических критериев прочности, а также критериев, учитывающих динамику нагружения. Сформулированы требования к уточненным расчетам на прочность зубчатых передач.

*Ключевые слова: трансмиссия, зубчатая передача, расчет на прочность, критерии прочности.*

Examines existing approaches to calculating the endurance of parts of transmissions of vehicles. The analysis of one-and two-parameter strength criteria, and criteria that take into account the dynamics of loading. The requirements for refined calculations there on the strength of the gears.

*Keywords: transmission, gear, calculation of strength, the strength criteria.*

Развитие автомобильной, тракторной техники и других видов транспортных средств идет в направлении повышения скоростей и ускорений, т. е. динамичности, что неизбежно приводит к увеличению динамических ударных нагрузок на детали. Но за счет этого можно достичь новых технико-экономических характеристик машин.

Традиционно считается, что для обеспечения надежности машин следует избегать динамических нагрузок. Этот тезис противоречит указанной выше тенденции развития. Следует наряду с увеличением динамических нагрузок наиболее полно использовать свойства существующих материалов и конструкций, а также искать материалы с новыми свойствами для работы в этих условиях. В теоретическом и расчетном плане для решения обозначенных задач необходимо определить критерии работоспособности материалов и деталей в условиях ударных нагрузок.

В большинстве случаев детали трансмиссий транспортных машин работают при переменных по величине и времени действия нагрузочных режимах, т.е. в так называемом неустановившемся режиме работы. При этом для расчетов используют метод приведения действительного нагрузочного режима к эквивалентному, который вызывает разрушение детали при таком же числе циклов нагружения, что и реальный. В работе И.А. Барского [1] указан порядок расчета на выносливость деталей, работающих в условиях переменных нагрузок. Кратко изложим его:

1. На основании длительных испытаний и статистической обработки материалов выбрать обобщенные осциллограммы действительных нагрузочных режимов тракторов данного тягового класса и назначения.

2. Обработывая обобщенную осциллограмму, построить гистограмму нагрузочных режимов.

3. На основании полученной гистограммы найти эквивалентный силовой фактор  $M_s$ .

4. Определить напряжения асимметричного цикла при действии эквивалентного силового фактора  $\sigma_{Rmax}$ .

5. Найти эквивалентный предел выносливости при симметричном цикле  $\sigma_{-1\sigma}$ .

6. Рассчитать допускаемые напряжения изгиба  $[\sigma_{-1}]$  или кручения  $[\tau_{-1}]$  с учетом конструктивных особенностей детали.

Вместе с тем И.А. Барский указывает, что «связь между пределами выносливости и механической прочностью материала для таких случаев нагружения мало изучена». Очевидно, что необходим новый метод (критерий) определения ресурса деталей трансмиссий транспортных машин, который должен отвечать следующим требованиям:

1. Учитывать весь спектр нагрузочных режимов любого элемента трансмиссии.
2. Опирается на фундаментальные общепринятые понятия и величины.
3. Для расчетов не использовать статистические данные или использовать их только для проверки. Не использовать поправочные коэффициенты.
4. Давать непротиворечивые результаты расчетов и при этом быть легко вычисляемым и проверяемым. Точность расчетов должна быть как можно более высокой.

В порядке обсуждения рассмотрим возможные варианты. Так как для совершения любого перемещения, даже на уровне атомов, необходимо затратить энергию, то в качестве критерия оценки механической прочности трансмиссии предложим меру изменения энергии - работу. Связь работы и энергии можно представить как

$$A = E \cdot \eta. \quad (1)$$

Иначе работа  $A$  деформации кристаллической решетки детали есть приложенная извне энергия  $E$  (механическая, тепловая и т. д.), умноженная на коэффициент «реализуемости»  $\eta$  этой энергии, который зависит от свойств материала детали. Целесообразно использовать критерий на основе работы разрушения, особенно в случаях ударных нагрузок, когда сила не всегда характеризует разрушение - напряжение становится условным понятием, а процесс разрушения становится предметом не сопротивления материалов, а физики [2].

Общепринято, что при быстром нагружении развитие пластических деформаций затруднено, а главенствующим механизмом разрушения оказывается развитие трещин [3]. Сложилось мнение, что процесс образования и развития трещин сопровождается пластическую деформацию металла от самых ранних ее стадий. Многие исследователи считают трещины обычным элементом структуры материала. Рассмотрим критерии разрушения, получившие наибольшее признание;

1. Критерий Гриффитса (1924) [4]. Вывод критерия основан на том, что упругая энергия, накопленная в металле при деформации, при появлении трещины преобразуется в поверхностную энергию. Критерий Гриффитса строго обоснован только для идеально хрупких тел. Следовательно, критерий разрушения не учитывает влияние пластической деформации в энергетике процесса.

2. Критерий Орована (1958) [5]. Этот критерий сходен с критерием Гриффитса, но вместо удельной поверхностной энергии в него входит удельная эффективная поверхностная энергия, учитывающая работу пластической деформации перед вершиной растущей трещины. Критерий Орована, казалось бы, допускает присутствие в пластичном металле трещин больших размеров, чем критерий Гриффитса при тех же внешних напряжениях  $\sigma$ , при действии которых эти трещины не растут. Однако критерий Орована по построению непригоден для описания условий зарождения и развития трещин малой длины.

3. Силовой критерий Ирвина (1957) [6]. Он показывает, что для обеспечения роста трещины напряжения в ее вершине должны достигать значения теоретической прочности. Проведение конкретных расчетов с помощью этого критерия требует информации о геометрии трещины в виде отношения «длина трещины» - «параметр кристаллической решетки», что существенно снижает его значимость и затрудняет практическую применимость.

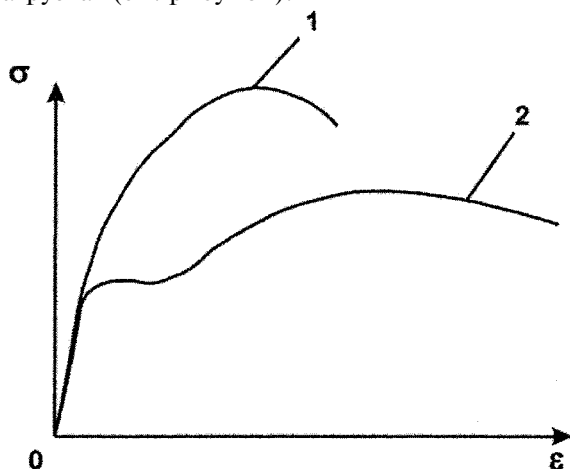
4. Критерий Хакена - Чудновского (1985) [7]. Плавление интерпретируют как разрушение и полагают при этом, что во время пластической деформации необходимо достичь такого изменения (возрастания) энтропии, которое соответствует разрушению (плавлению). Однако отождествление плавления и разрушения не имеет физического обоснования, поскольку переход металла в жидкое состояние не означает его разрушения, так как силы межатомного взаимодействия по причине своей центральности при этом не разрушаются.

5. Энергетический контурный J-интеграл (критерий Черепанова (1967) - Раиса (1968)) [8, 9]. Контурный J-интеграл был предложен в качестве параметра разрушения для нелинейно упругого тела с трещиной при плоской деформации. В рамках деформационной теории пластичности, т. е. при отсутствии разгрузки материала, концепция J-интеграла оказывается справедливой для упру-

гопластического поведения твердого тела. Критерий, по существу, является однопараметрическим, но требует выполнения упругопластического расчета тела с трещиной - и, таким образом, учитывает пластичность. Кроме того, не учет разгрузки может быть важен, если только трещина не разрушает деталь при первом же нагружении.

6. Критерий Морозова (1997) [10]. Основан на двух критериях - критерии хрупкого (линейная механика разрушения) и пластического (предельный анализ по теории пластичности) разрушения с интерполяцией между ними в области упругопластического разрушения.

Известно, что скорость приложения нагрузки заметно сказывается на характере наблюдаемых зависимостей между деформациями и напряжениями. Поскольку при быстром нагружении пластические деформации не успевают полностью реализоваться, материал с увеличением скорости деформации становится более хрупким и  $\delta$  уменьшается. Так как скольжение частиц образца по наклонным площадкам затруднено, должна несколько увеличиться разрушающая нагрузка. Сказанное можно проиллюстрировать, сопоставив диаграммы растяжения при медленно и быстроизменяющейся нагрузках (см. рисунок).



Зависимости напряжения от деформации:  
1 - для быстроизменяющейся нагрузки; 2 - для статической нагрузки

Рассмотрим некоторые основные критерии динамического разрушения. В наиболее часто используемых критериях разрушения считается, что время и напряжение являются важнейшими переменными в прогнозировании микроразрушений и структурных нарушений при динамическом нагружении. Общие подходы, представленные Тулером - Бачером (Tuler - Butcher (1968)) [11] и Гилманом - Тулером (Gilman - Tuler (1970)) [12], используют функцию разрушения  $\phi$  как функцию всей продолжительности нагружения  $\sigma(t)$  :

$$\phi = \int_0^t f[\sigma(t)] dt, \quad (2)$$

где  $\phi$  выбирается для любой удобной функции разрушения;  $t$  - время.

Когда  $\phi$  достигает критического значения,  $t$  становится временем разрушения  $t_F$ . Например,  $\phi$  может формировать общее число или объем микротрещин. Было предложено Тулером - Бачером, что функцию  $f[\sigma(t)]$  можно разложить по степеням  $(\sigma - \sigma_0)$ , где  $\sigma_0$  - пороговое напряжение, ниже которого не происходит разрушение. Было предложено, что одна величина может быть преобладающей, поэтому

$$\phi = \int_0^t (\sigma - \sigma_0)^\lambda dt, \quad (3)$$

где  $\lambda$  - константа, определяемая для материала экспериментально.

Обращаясь к концепции совокупного ущерба, Тулером - Бачером [11] был предложен следующий критерий разрушения:

$$l = \int_0^{t_F} \left( \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_r} \right)^\lambda dt, \quad (4)$$

где  $\sigma_r$  - эталонное напряжение;  $t_F$  - время до разрушения.

К настоящему времени предложено много других критериев, основанных на критерии Тулера-Бачера. Например, Кагнуокс, Ванжия и др. (Cagnoux (1985), Wanjia et al. (1992)) [13, 14] добавили в критерий параметр нагружения  $D$  как внутреннюю переменную. Измененный критерий Тулера - Бачера, предложенный Кагнуоксом (Cagnoux (1985)), описывается следующим отношением:

$$l = \int_0^{t_F} \left( \left( \frac{1}{\sigma_r} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_0}{1 - D} \right) \right)^\lambda (1 - D)^{\lambda - b\sigma} dt. \quad (5)$$

где  $\lambda$  и  $b$  - параметры материала.

В работе Кагнуокса (Cagnoux (1985)) параметр  $\lambda$  был произвольно установлен в единицу. В работе Ванжия и др. (Wanjia et al. (1992)) измененный критерий Тулера - Бачера был записан как

$$l = \int_0^{t_F} \left( \left( \frac{1}{\sigma_r} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_0}{1 - D} \right) \right)^\lambda dt. \quad (6)$$

Вышеперечисленные критерии, где время и напряжение являются важными переменными, имеют феноменологическую основу. Чтобы объяснить физические механизмы разрушения, Журков (Zhurkov (1965)) [15] предложил на основе кинетической концепции этих механизмов универсальное соотношение между временем до разрушения  $t_F$ , напряжением  $\sigma$ , энергией барьера  $AU$  и температурой  $T$  в виде

$$t_F = t_0 \exp\left(\frac{\Delta U}{kT}\right), \quad (7)$$

где  $\Delta U = U_0 - \beta\sigma$  - эффективный энергетический барьер; постоянная  $t_0$  является, по существу, взаимной собственной частотой колебаний атомов в твердом теле;  $U_0$  является энергией в масштабах атома; коэффициент  $\beta$  является параметром микроструктуры.

Критерий Журкова был изменен Дреминым и Молодцовым (Dremin and Molodets (1986)) [16]. Они использовали тот факт, что при пластической деформации разрушение происходит не мгновенно, а через некоторое «накопленное» время. Таким образом, они использовали накопление повреждений как совокупную функцию  $\dot{\phi}$ , которая характеризует термоактивную стадию разрушения:

$$\phi = \dot{\phi}_0 \exp\left(\frac{-\Delta U}{kT}\right) u l = \int_0^{t_F} \dot{\phi} dt. \quad (8)$$

Они предположили, что переменная  $\dot{\phi}_0 = \frac{1}{t_0} U_0 u \beta$  не зависит от температуры.

Подход Журкова развил Клепачко (Klenczko (1990)) [17], который предложил совокупный критерий для короткого и сверхкороткого времени нагружения. Для получения этого критерия он использовал энергию активации, предложенную Екобори (Yokobori (1952)) [18]:

$$\Delta U(\sigma) = \Delta U_0 \ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right). \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в формулу (8), он получил следующий критерий:

$$t_{C_0} = \int_0^{t_F} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\frac{\Delta U_0}{kT}} dt, \quad (10)$$

где  $\Delta U_0$  — барьер энергии для ненапряженного тела;  $\sigma_0$  - пороговое напряжение, соответствующее характерному времени  $t_c$ ;  $t_F$  - время до разрушения.

Этот критерий был успешно использован Ханым и Клепачко (Hanım, Klepaczko (1997, 1999, 2001)) [19-21] для моделирования разрушения алюминиевого сплава при плоском воздействии. Позже Ханым (1998), Ханым и Клепачко (1999, 2010) показали эффект влияния температуры на этот критерий, выразив пороговое напряжение  $\sigma_0$  как функцию температуры:

$$\sigma_0(T) = \sigma_0^0 \frac{G(T)}{G_0}, \quad (11)$$

где  $\sigma_0^0$  - пороговое напряжение при абсолютной температуре около 0 К;  $G(T)$  - модуль сдвига при температуре около 0 К.

На основании анализа волновой динамики при растрескивании Канелом и др. (Kanel et al. (1996)) [22] были установлены эмпирические зависимости между скоростью разрушения и напряжением:

$$\dot{\phi} = \chi \left( \frac{\sigma}{\sigma_n} \right)^\alpha. \quad (12)$$

Здесь  $\dot{\phi}$  – объемная скорость деформации;  $\alpha$  и  $\chi$  – характеристики материала;  $\sigma_n$  – пороговое межатомное напряжение. Параметр  $\chi = 4$  был принят в работе Канела и др.

Для учета влияния температуры Канел и др. предложили следующее значение  $\sigma_n$ :

$$\sigma_n(T) = \sigma_n^0 \frac{g(T)}{g(T_0)} \quad (13)$$

$$\text{при } g(T) = k_1 \ln(T_m - T) + k_2, \quad (14)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  - подгоночные параметры;  $T_m$  - температура плавления;  $T$  и  $T_0$  - текущая и начальная температура.

Как указывает Гилман и Тулер (Gilman and Tuler (1970)) [12], критерии, описанные выше, могут быть обобщены формулой (2). Однако эти критерии основаны только на пластической форме развития повреждений и не описывают механизмы их зарождения, роста и слияния. Можно классифицировать эти критерии как критерии типа «Тулера - Бачера».

Второй тип критериев динамического разрушения основан на зарождении и росте трещин и пустот. Рассмотрим некоторые из них.

В критерии, предложенном Барби и др. и Курраном и др. (Barbee (1972) and Curran (1987)) [23, 24], уравнение функции для скорости образования микротрещин хорошо согласуется с экспериментальными результатами Журкова (Zhurkov (1965)) [25]:

$$\dot{N} = \dot{N}_0 \exp\left(\frac{\sigma - \sigma_n}{\sigma_r}\right), \quad (15)$$

где  $N_0$  - порог скорости образования микротрещин;  $\sigma_n$  - порог напряжения образования микротрещин;  $\sigma_r$  - относительное напряжение.

Темпы роста, предложенные Барби и др. (1972) и Курраном и др. (1987), определяются по формуле

$$\dot{R} = \left( \frac{\sigma - \sigma_{g_0}}{4\eta} \right) R, \quad (16)$$

где  $R$  – радиус вершины пустоты/трещины;  $\sigma_{g_0}$  - прирост порогового напряжения;  $\eta$  - ударная вязкость материала.

Общий объем пустот  $V_v$ , связанный с зарождением микротрещин и ростом в конце интервала времени приложения нагрузки  $\Delta t$ , определяется по форме сферических полостей Барби и др. и Куррана и др. согласно формуле

$$V_v = 8\pi \dot{N} \Delta t R_0^3 + V_{v0} \exp\left(3 \frac{\sigma - \sigma_{g_0}}{4\eta} \Delta t\right), \quad (17)$$

## Расчет и конструирование

где  $V_{v0} = 8\pi\dot{N}_0\Delta tR_0^3$  и  $R_0$  - относительный объем полости и радиус соответственно в начальный момент времени.

Для описания зарождения микротрещин и полостей в пластичных металлах Ражендраном и др. (1989) (Rajendran et al., 1989) [26] была предложена динамическая модель, названная моделью RDG. В ней процесс зарождения полостей моделировался с помощью гауссового распределения. Рассмотрим только зарождение очагов и полостей в RDG модели, при этом не будем использовать пластическую составляющую. Если мы обозначим через  $f$  объемную долю полостей, то скорость развития этих фракций будет определяться формулой Чу и Нидлемана (Chu and Needleman, 1980) [27]:

$$f = F_\sigma \dot{\sigma} + F_\varepsilon \dot{\varepsilon}^P + \dot{f}_g. \quad (18)$$

Первое слагаемое в формуле (18) является составляющей развития трещины, определяемое напряжением; второе слагаемое является составляющей, определяемой деформацией; последнее слагаемое  $\dot{f}_g$  представляет собой скорость роста трещины. В формуле (18)  $\dot{\sigma}$  - скорость нарастания напряжения;  $\dot{\varepsilon}^P$  - скорость развития пластической деформации;  $F_\sigma$  и  $F_\varepsilon$  задаются следующими гауссовыми распределениями, как первоначально предложили Чу и Нидлемана (1980):

$$F_\sigma = \frac{f_1}{s_1\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma - \sigma_n}{s_1}\right)^2\right); \quad (19)$$

$$F_\varepsilon = \frac{f_2}{s_2\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon^P - \varepsilon_n}{s_2}\right)^2\right). \quad (20)$$

Здесь  $\sigma_n$  и  $\varepsilon_n$  означают эквивалентный порог напряжения и деформацию, соответственно, вокруг очага зарождения микротрещины, которые распространяются по закону гауссового распределения. Значения  $s_1$  и  $s_2$  являются стандартными отклонениями этих распределений. Значения  $f_1$  и  $f_2$ , определяют максимально допустимый объем фракций через очаги напряжения и деформации, соответственно. В модели RDG темпы роста полостей определяется соотношением

$$\dot{f}_g = (1 - f)\dot{\varepsilon}_{ii}^P, \quad (21)$$

где  $\dot{\varepsilon}_{ii}^P$  - следы тензора скоростей пластической деформаций, который представляет собой скорость неупругой объемной деформации. Отметим, что в модели RDG, как и в модели Барби и др. и Керран и др., пороговые переменные не зависят от давления и температуры.

Проведенный анализ критериев разрушения показал, что подавляющее большинство их можно классифицировать на две категории: критерии типа «Тулера - Бачера», и критерии, основанные на зарождении и росте трещин и пустот. Тем не менее, есть и другие критерии, но они похожи на один из двух типов, описанных выше, (см., например, работы Eftis (1991) and Nemes (1992)) [28]. Однако современные методики расчета деталей машин не содержат рекомендаций по выбору того или иного критерия. Например, в настоящее время расчет шестерен при динамическом нагружении проводят по ГОСТ 21354—87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность». Получаемые на первом этапе расчетов значения справедливы для статического нагружения. Далее их необходимо умножить на рекомендуемый полуэмпирический коэффициент динамичности. Окончательные значения массово-габаритных характеристик зубчатых колес являются неточными и, как правило, завышенными.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что используемые методы расчета зубчатого зацепления в трансмиссиях транспортных машин требуют уточнения обоснованием применения проанализированных выше критериев разрушения, что позволило бы, в частности, повысить надежность трансмиссии и более полно использовать свойства существующих материалов и конструкций. Вместе с тем необходимо выработать рекомендации по применению того или иного критерия прочности к расчетам отдельных узлов в зависимости от условия их работы. Более того, при разработке современной методики проектирования зубчатых передач необходимо учитывать следующие направления снижения их динамической нагруженности:

1. Выбор оптимального, с точки зрения снижения контактных напряжений, профиля рабочей поверхности зуба или повышение податливость зубчатого венца шестерни.
2. Использование новых конструктивных решений составных (клееных) зубчатых колес или внедрение в них механических гасителей колебаний.
3. Замена материалов зубчатых колес при изготовлении на неметаллические с уточнением соответствующих расчетов, и прежде всего теплового расчета.
4. Использование многокомпонентных дисперсионных смазочных материалов и учет их демпфирующих свойств при контакте зубьев.
5. Проведение уточненных расчетов на ЭВМ в соответствии с критерием Тулера - Бачера, позволяющих оценить величину динамических нагрузок и ресурс детали.

#### Литература

1. Барский, И.Б. Конструирование и расчет тракторов / И.Б. Барский. - М.: Машиностроение, 1980.
2. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. - М.: МГТУ им. Баумана, 1999.
3. Владимиров, В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
4. Griffith, A.A. The theory of rupture / A. A. Griffith // Proc. Ist. Congr. Appl. Mech. -Delft, 1924. -P. 55-63.
5. Orowan, E. Fundamentals of brittle behaviour of metals / E. Orowan //Fatigue and Fracture of Metals.-New York: Wiley, 1952.-P. 139-167.
6. Irwin, G.R. Analysis of stress and strains near the end of a crack traversing a plate / G.R. Irwin //Trans. ASME. J. Appl. Mech. - 1957. - V. 24. -P. 361-364.
7. Хакен, Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах/Г. Хакен. - М.: Мир, 1985. - 423 с.
8. Черепанов, Г.П. О распространении трещин в сплошной среде /Г.П. Черепанов // Прикл. матем. и механика. - 1967. -№ 3.-С. 476-488.
9. Rice, J.R. Some further results of integral analysis and estimates / J.R. Rice, P.C. Paris, J.G. Merkle //Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTMSTP 536. American Society for Testing and Materials. -Philadelphia, 1973. -P. 231-245.
- Ю.Морозов, Е.М. Механика разрушения упругопластических тел / Е.М. Морозов. — М.: МИФИ, 1986. - 88 с.
11. Tyler, F.R A criterion for the time dependence of dynamic fracture / F.R. Tyler, B.M. Butcher // Int. J. Fract. Mech. - 1968. -4.-P. 431-437.
12. Gilman, J.J. Dynamic fracture by spallation in metals /J.J. Gilman, F.R. Tuler // Int. J. Fract. Mech. - 1970. - 6 (2). - P. 169-182.
13. Cagnoux, J. Deformation et mine d'un verre pyrex soumis a un choc intense: etude experimental et modelisation du comportement: PhD dissertation /J. Cagnoux. — France, 1985.
14. Study on dynamic damage-accumulation for the stainless steel (00Cr18Ni9) / Z. Wanjia, Z. Yuanjin, S. Chunxiang, W. Wu // Proceeding of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects. - Chengdu, China, 1992. - P. 339.
15. Zhurkov, S.N. Kinetic concept of the strength of solids /S.N. Zhurkov //Int. J. Fract. - 1965. — 1. -P. 311.
16. Dremin, A.N. On the spall strength of metals /A.N. Dremin, A.M. Molodets //Proceeding of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects. - Beijing, China, 1986. - P. 13—21.
17. Klepaczko, J.R. Dynamic crack initiation, some experimental methods and modeling / J.R. Klepaczko //Klepaczko, J.R. (Ed.), Crack Dynamics in Metallic Materials. - Springer-Verlag, Vienna, 1990. - P. 255.
18. Yokobori, T. The Cottrell-Bilby theory of yielding of iron / T. Yokobori // Phys. Rev. - 1952. — 88.-P. 1423.
19. Hanim, S. Numerical study of spall in an aluminum alloy under planar impact loading / S. Hanim, J.R. Klepaczko //Journal de Physique. - 1997. - P. 791.

20. Hanim, S. Numerical study of spalling of an aluminum alloy 7020-T6 / S. Hanim, J.R. Klepaczko // *International Journal of Impact Engineering*. - 1999. - 22. - P. 649.
21. Hanim, S. Effects of initial temperature on spalling of metals / S. Hanim, J.R. Klepaczko // *Journal de Physique*. - 2000. - 10. - P. 397.
22. Kanel, G.I. Simulation of spall fracture of aluminum and magnesium over a wide range of load duration and temperature / Kanel, G.I., Razorenov, S. V., Bogatch et al. // *Hyper Velocity Impact Symposium*. - Freiburg. 1996.
23. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals / T.W. Barbee, Jr. Seaman, R.L. Crewdson, D.R. Curran // *Journal of Materials, JMLSA*. - 1972. -7.-P. 393-401.
24. Curran, D.R. Dynamic failure of solids / D.R. Curran, L. Seaman, DA. Shockey // *Physics Reports*. - 1987. - 5-6 (147). -P. 253-388.
25. Zhurkov, S.N. Kinetic concept of the strength of solids / S.N. Zhurkov // *Int. J. Fract.* - 1965. - 1.-P.311.
26. Rajendran, A.M. A void nucleation and growth based failure model for spallation / A.M. Rajendran, M.A. Dietenberger, D.J. Grove // *J. Appl. Phys.* - 1989. - 65. -P. 1521-1527.
27. Chu, C.C. // *J. Eng. Mater. Tech.* - 1980. - 102. - P. 249.
28. Eftis, J. Viscoplastic analysis of plate-impact spallation / J. Eftis, J.A. Nemes, P. W. Randies // *International Journal of Plasticity*. - 1991. -7. - P. 15-39.

*Поступила в редакцию 31 мая 2010 г.*

**Драгунов Геннадий Дмитриевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили», Южно-Уральский государственный университет (г.Челябинск); (351)267-94-41; [dgd@susu.ac.ru](mailto:dgd@susu.ac.ru); 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Область научных интересов - тепловые двигатели, механика трансмиссий машин.

**Gennadiy D. Dragunov.** Doctor of Technical Sciences, Professor of «Cars» South-Ural State University, (351) 267-94-41; [dgd@susu.ac.ru](mailto:dgd@susu.ac.ru); 454080, Chelyabinsk, Lenin Avenue, 76. Research Interests heat engines, mechanical transmissions of cars.

**Яковлев Петр Витальевич.** Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); (351) 267-94-41, [pv\\_jk@mail.ru](mailto:pv_jk@mail.ru); 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Область научных интересов - трансмиссии транспортных машин.

**Peter V. Yakovlev.** Candidate of technical sciences, assistant professor of «Cars» South-Ural State University, (351) 267-94-41, [pvjk@mail.ru](mailto:pvjk@mail.ru); 454080, Chelyabinsk, Lenin prospect, 76. Interests - transmission of transport vehicles.