

УДК 534.1

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ СКОЛЬЖЕНИИ НАГРУЗОК ПО РЕЛЬСОВЫМ НАПРАВЛЯЮЩИМ РАКЕТНОГО ТРЕКА

© Сергей Иванович Герасимов, Владимир Иванович Ерофеев,
Валерий Григорьевич Камчатный, Ирина Александровна Одзерихо
Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия
erof.vi@yandex.ru

Аннотация. Изучаются процессы изменения механических характеристик материала, интенсивных пластических деформаций и уноса материала с рабочих поверхностей при высокоскоростном скольжении нагрузок по рельсовым направляющим ракетного трека.

Ключевые слова: рельсовая направляющая, ракетный трек, высокоскоростное скольжение, расчет, эксперимент.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант № 14-19-01637).

THERMOMECHANICAL AND DEFORMATION PROCESSES AT HIGH-SPEED SLIPPING OF LOADS ON RAIL GUIDES ROCKET TRACK

© S.I. Gerasimov, V.I. Erofeev, V.G. Kamchatny, I.A. Odzerikho
Mechanical Engineering Research Institute of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia
erof.vi@yandex.ru

Abstract. The processes of changing the mechanical characteristics of the material, intensive plastic deformations and the entrainment of material from the working surfaces are studied at high-speed sliding of loads along the rail guides of the rocket track.

Key words: rail guide, rocket track, high-speed slip, calculation, experiment.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 14-19-01637.

Для разгона полезной нагрузки при постановке экспериментов на ракетном треке, как правило, используются ракетные поезда двух схем: монорельсовые и двухрельсовые. Монорельсовые поезда имеют более высокие по сравнению с двухрельсовыми плотности компоновки двигателей и лучшие коэффициенты качества конструкции ступеней, благодаря чему с их помощью достигаются более высокие скорости разгона. Вместе с тем, в некоторых случаях движение высокоскоростных ступеней монорельсовых ракетных поездов (обычно последней или предпоследней) сопровождается значительным износом рабочих поверхностей их опорных башмаков и креном, превышающим допустимые значения, а также поломками башмаков и повреждением рельсовой направляющей.

Указанные аномалии в движении высокоскоростных ступеней ракетных поездов являются следствием ряда особенностей динамики взаимодействия высокоскоростных объектов по

рельсовой направляющей. Наиболее существенные из них: волновые процессы в направляющей [1-6] и условия на скользящем контакте рабочих поверхностей опорных башмаков ступени с направляющей.

Взаимодействие движущегося объекта с рельсовой направляющей при высоких скоростях скольжения характеризуется фрикционным нагревом рабочих поверхностей до температур, близких к температуре плавления материала трущихся тел. В результате этого в слоях, прилегающих к границе контакта, происходит изменение механических характеристик материала, интенсивные пластические деформации и унос материала с рабочих поверхностей.

Изучению этих процессов и посвящена публикуемая работа.

Отличительной особенностью высокоскоростного трения является интенсивное тепловыделение в зоне контакта трущихся тел. Удельная интенсивность тепловыделения на единицу площади касания [7]:

$$q = K_{тр} p_k V_x, \quad (1)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трения, p_k – номинальное давление в контакте, V_x – скорость скольжения.

В условиях кратковременных процессов высокоскоростного трения материалы контактирующей пары не успевают прогреваться на всю глубину. В теплопоглощении участвуют лишь поверхностные слои, примыкающие к зоне контакта. По проведенным оценкам эффективная глубина проникновения теплового импульса в тело башмака составляет 0,2-0,5 мм.

С увеличением температуры поверхности трения происходит насыщение контакта и номинальное давление в контакте достигает значения твердости HB материала при температуре поверхности контакта.

Повышение температуры поверхности трения ведет к потере механических свойств материала рабочих поверхностей опорного башмака. Зависимости твердости HB и модуля упругости E материала башмака (сталь 30 ХГСА) от температуры приведены на рис.1 [8,9].

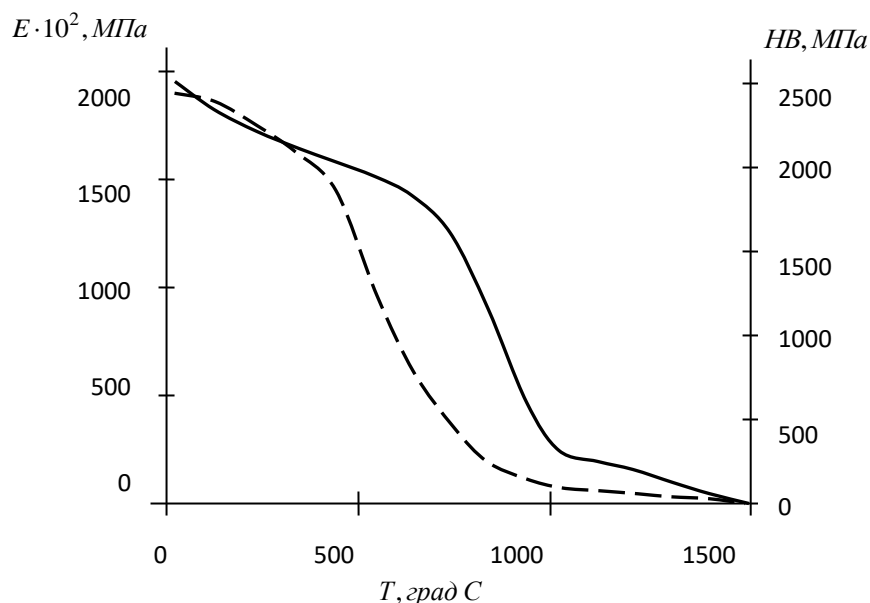


Рис. 1. Зависимости модуля упругости (сплошная линия) и твердости (пунктир) от температуры.

При некоторой температуре нагретого слоя давление в контакте станет равным текущему значению твердости материала и начнется унос прогретого слоя с рабочей поверхности башмака. Из физики явления следует, что чем выше давление в контакте, тем ниже температура прогретого слоя рабочей поверхности башмака. Это подтверждают и результаты металлографических и химических исследований поверхности трения опорного башмака [10].

Уравнение теплового баланса для зоны контакта имеет вид [11]:

$$K_q q dt = (T_k - T_b) C_p \rho_b dh, \quad (2)$$

где K_q – коэффициент распределения теплового потока, C_p – теплоемкость материала башмака, ρ_b – плотность материала башмака, T_k – средняя температура слоя толщиной dh , T_b – исходная температура материала башмака.

Изменение температуры поверхности трения ведет к изменению механических свойств поверхностных слоев трущихся тел, определяющих величину коэффициента трения. Задавшись линейным характером изменения коэффициента трения от текущей твердости поверхности трения [12] и принимая во внимание равенство давления в контакте текущей твердости, можно получить

$$K_{mp} = K_{mp}^* \frac{p_k}{p_k^*}, \quad (3)$$

где знаком * отмечены параметры, для которых из условий эксперимента определяется значение K_q .

Подставив выражение для удельной интенсивности тепловыделения (1) в уравнение теплового баланса (2) с учетом выражения (3) можно вычислить скорость перемещения границы слоя, прогретого до температуры T_k , при которой происходит унос материала, т.е., по существу, скорость уноса материала с рабочей поверхности башмака

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K_u}{(T_k - T_\delta)} V_x \frac{p_k^2}{p_k^*}, \quad (4)$$

где $K_u = \frac{K_q K_{mp}^*}{C_p \rho_b}$ – коэффициент износа рабочих поверхностей башмака.

Из условий эксперимента, длившегося 2 секунды, в котором скорость скольжения V_x изменялась в интервале 500-890 м/с, давление в контакте p_k изменялось в интервале 0-18 МПа и результирующий износ достиг 16 мм, рассчитанное значение коэффициента распределения теплового потока K_q составило 0,21 и коэффициента износа: $1,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ град/Н}$.

Полученный результат не противоречит физике явления. Часть тепла, передаваемого из зоны трения башмаку, идет на нагрев уносимого материала, часть рассеивается в пространстве за счет излучения и уходит на нагрев глубже лежащих слоев башмака за счет теплопроводности. По результатам 21% тепла, генерируемого за счет трения в зоне контакта, расходуется на нагрев уносимого материала и 79% теряется за счет теплопроводности и излучения и уходит на нагрев рельсовой направляющей.

Таким образом, зная скорость скольжения V_x , температурные зависимости давления в контакте $p_k(t)$, твердости материала $HB(t)$ и модуля упругости $E(t)$, можно рассчитать для прогретого слоя в зоне скользящего контакта значения температуры T_k , модуля упругости E_k , скорости износа рабочих поверхностей башмака h , коэффициента трения K_{mp} .

Учет условий на скользящем контакте в модели взаимодействия высокоскоростной ступени с рельсовой направляющей позволил добиться удовлетворительного согласования результатов расчета динамики ступени с результатами эксперимента. На рис.2 представлены расчеты крена ступени в виде непрерывной кривой. Отдельными точками показаны результаты измерений крена в реальном опыте на ракетном треке. Скорость движения ступени на участке замера крена составила 1450 м/с, угол крена ступени – 8 градусов.

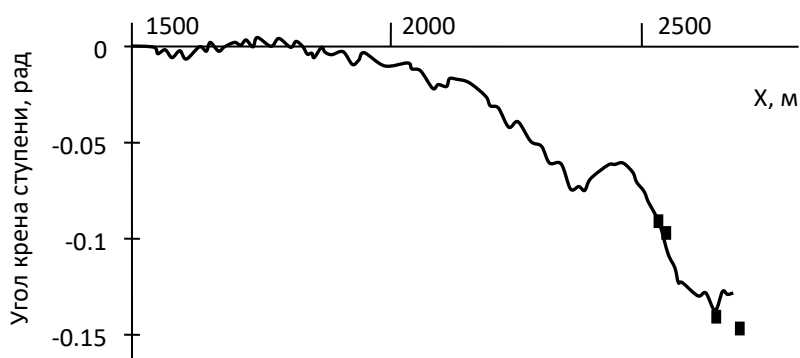


Рис. 2. Зависимость угла крена ступени от пройденного ею расстояния по рельсовой направляющей: расчет (сплошная линия), эксперимент (квадратные метки).

Таким образом, в работе показано, что взаимодействие движущегося объекта с рельсовой направляющей при высоких скоростях скольжения характеризуется фрикционным нагревом рабочих поверхностей до температур, близких к температуре плавления материала трущихся тел. В результате этого в слоях, прилегающих к границе контакта, происходит изменение механических характеристик материала, интенсивные пластические деформации и унос материала с рабочих поверхностей. Определено, что зная скорость скольжения, температурные зависимости давления в контакте, твердости материала и модуля упругости можно рассчитать для прогретого слоя в зоне скользящего контакта значения температуры, модуля упругости, скорости износа рабочих поверхностей башмака, коэффициента трения.

Список литературы

1. Бутова С.В., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2015. - № 1. - С.3-8.
2. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Камчатный В.Г., Каныгин И.И. Оценка резонансоопасных гармоник при колебаниях упругой направляющей с движущимся по ней двухопорным объектом // Проблемы прочности и пластичности. - 2015. - Т.77, № 4. - С.412-424.
3. Герасимов С.И., Ерофеев В.И. Расчет изгибно-крутильных колебаний рельсовой направляющей ракетного трека // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2016. - № 3. - С.25-27.

4. Ерофеев В.И., Колесов Д.А., Лисенкова Е.Е. Особенности генерации волн источником, движущимся по одномерной гибкой направляющей, лежащей на упруго-инерционном основании // Акустический журнал. - 2016. - Т.62, № 6. - С.639-647.
5. Ерофеев В.И., Лисенкова Е.Е. Возбуждение волн нагрузкой, движущейся по поврежденной гибкой одномерной направляющей, лежащей на упругом основании // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2016. - № 6. - С.14-18.
6. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Лисенкова Е.Е. Задачи волновой динамики систем, несущих движущиеся нагрузки, и их приложение к испытаниям на ракетном треке // III Международная Школа-конференция молодых ученых «Нелинейная динамика машин» - School-NDM 2016: Сборник трудов (Москва, 12-15 апреля 2016 г.). - М.: ИМАШ РАН, 2016. - С.45-54.
7. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. - М.: Машиностроение, 1980. - 135 с.
8. Чичинадзе А.В., Гинзбург А.Г., Горюнов В.М. Определение критериев работоспособности материалов при высоких скоростях скольжения // Трение и износ. - 1981. - Т.11, № 3. - С.479-494.
9. Авиационные материалы. Справочник в 9-ти томах. Т. 2. - М.: ОНТИ, 1975. - 368 с.
10. Карпенко Ю.А., Гершман И.С., Буше Н.А., Чернина Е.В., Камчатный В.Г., Шемякин Н.Н., Пенский Н.В. Методика проведения испытаний на трение со сверхзвуковыми скоростями скольжения // Трение и износ. - 1994. - Т.15, № 1. - С.71-77.
11. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.
12. Горюнов В.М. Исследование трения при нестационарном высокоскоростном режиме // Новое в теории трения. - М.: Наука, 1966. - С.91-97.