

МАШИНОСТРОЕНИЕ

С. П. КРАВЧУК, В. А. ЗИМБИЦКИЙ, М. Г. СТАКЯН, Г. Д. ПЕТРОСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН
В ШЕКАХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Растущая потребность в повышении скоростей и производительности машин для различных отраслей промышленности и сельского хозяйства диктует необходимость постоянно повышать мощность ДВС — основного энергетического мобильного машин. В современном двигателестроении это повышение осуществляется за счет форсирования при сохранении основных весовых и конструктивных параметров ДВС, что приводит к повышению нагруженности ответственных деталей двигателя, в частности, коленчатого вала и требует детального изучения процессов разрушения, с целью полного использования его ресурса прочности и долговечности.

Анализ эксплуатации автотракторных двигателей показывает, что (60—80) % отказов коленчатых валов составляют поломки от знакопеременных напряжений изгиба. Зарождению усталостных трещин при этом способствуют высокая концентрация напряжений в галтелях коренных и шатунных шеек и структурные концентраторы напряжений, вызванные дефектами проката и некачественной термо-механической обработкой поверхностей.

Ввиду высокой концентрации напряжений галтельные участки шеек испытывают местные упруго-пластические деформации при общем упругом деформировании вала. После исчерпания пластичности наступает процесс расслаивания металла, приводящий к зарождению усталостной трещины, которая под действием циклических перенапряжений и по мере накопления повреждений распространяется на периферийные участки шеек. При этом роль концентратора напряжений уже отводится вершине острой трещины, имеющей тенденцию роста. Упруго-пластический характер зарождения и развития трещины подтверждается также бороздчатой структурой усталостного излома коленчатого вала. Развитие усталостной трещины при этом связано со значительными энергетическими затратами на пластическую деформацию металла в ее вершине, что обуславливает прерывисто-скачкообразный характер роста при сравнительно низкой скорости ее развития. Уравнение баланса энергии коленчатого вала с трещиной при этом имеет вид:

$$dA = dW + dT, \quad (1)$$

где dA — механическая работа внешних сил P_1 ; dW — энергия, накопленная в теле; $d\Gamma$ — энергия разрушения.

Выразив компоненты уравнения (1) через усилия и перемещения и учитывая, что они состоят из упругих и пластических составляющих, а энергия разрушения $d\Gamma$ определяется затратой энергии на работу пластических деформаций в вершине трещины на стадии ее стабильного роста, получим:

$$P_1 d\bar{u}_1 \geq d\bar{W} + dW_s + \sigma_{s1} \cdot ds \cdot d\bar{u}_1, \quad (2)$$

где P_1 — нагрузка, действующая на вал; \bar{u}_1 , \bar{u}_1 — упругая и пластическая составляющие деформации; $d\bar{W}$ — энергия упругой деформации; dW_s — диссипация энергии в вершине трещины; σ_{s1} — предел текучести материала; ds — приращение площади трещины.

Третье слагаемое в правой части уравнения (2) характеризует энергию разрушения, знак ($>$) соответствует условию продвижения трещины, а знак ($=$) — энергетически равновесному состоянию колеччатого вала с трещиной.

Структура уравнения (2) определяет методы воздействия на усталостную трещину с целью предотвращения ее роста. Для этого следует увеличить правую часть (2), которую можно осуществить следующими методами:

а) повышением прочностных свойств материала вала или наиболее нагруженных его участков — применением упрочняющей технологии или заменой материала на более качественный (увеличивается \bar{W});

б) увеличением диссипации энергии через развивающуюся усталостную трещину или плотности поверхностной энергии разрушения — созданием барьеров на пути продвижения трещины [1].

В настоящей работе рассмотрен один из способов воздействия на трещину, заключающийся в закалке ТВЧ периферийных участков цек колеччатых валов (рис. 1) [2], и изучена кинетика трещин в щеках, подвергнутых закалке и неупрочненным (серийные колеччатые валы).

Закалка цек произведена на машинном генераторе ТВЧ, а требуемая конфигурация закаливаемых участков обеспечена формой специально разработанного индуктора [3]. При назначении режимов термообработки исходными параметрами служили глубина закаленного слоя, твердость и микроструктура, оптимальные значения которых получены вариацией температуры и скорости нагрева и охлаждения, а также температуры самоотпуска. Последняя величина имеет значительное влияние на характеристики сопротивления усталости колеччатых валов, т. к. правильный ее выбор предотвращает появление закалочных трещин и определяет твердость и микроструктуру закаленных участков.

Регистрация трещин осуществлена тензорезисторами, расположенными по направлению развития трещины. Испытания на усталость проведены на вибростенде при симметричном изгибе коленчатых валов, а база испытаний составляла 10^7 циклов.

Наличие на пути продвижения усталостных трещин упрочненных участков I (рис. 1), обладающих высокой плотностью поверхностной энергии разрушения, способствует ветвлению этих трещин, а это в свою очередь вызывает повышенную диссипацию энергии в вершинах разветвленной трещины и увеличивает энергию разрушения [4]. Эти два фактора предопределяют торможение трещины при приближении ее к упрочненным участкам щек вплоть до полной остановки. Используем уравнение (2) для определения предельной нагрузки на вал с закаленными щеками. При этом исходим из того, что трещина в упрочненном вале зарождается при нагрузке, превышающей предельную для неупрочненного вала, но благодаря упрочненным участкам тормозится на стадии стабильного роста. Тогда, согласно расчетной схеме на рис. 2а, компоненты уравнения (2) будут равны:

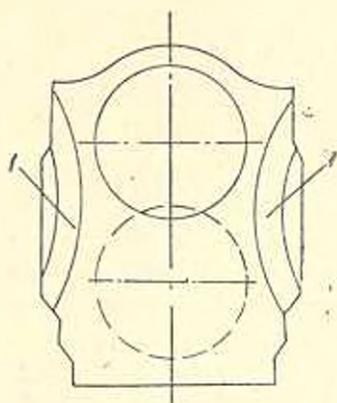


Рис. 1. Щека коленчатого вала двигателя Д-240 с закаленными участками I.

$$P_i d\bar{u}_i = \int_{\Sigma} z_i d\bar{u}_i d\sigma; \quad dW = \int_{\Sigma} \sigma_i d\bar{u}_i d\sigma - \int_{\Sigma} \sigma_i d\bar{u}_i d\sigma; \quad (3)$$

$$d\bar{W} = \int_{\Sigma_0} z_0 dr d\sigma - \int_{\Sigma} z_1 dr d\sigma; \quad z_1 ds \cdot d\bar{u}_1 = \int_{\Sigma} z_1 dr d\sigma - \int_{\Sigma} z_1 dr d\sigma,$$

где Σ , Σ_0 , Σ — соответственно, поверхности сечения А—А, трещины и пластической зоны в вершине трещины; dr — размер зоны в вершине трещины, в которой напряжения меняются по криволинейному закону; σ_1 — напряжения в вершине трещины. Совместно решая (2) и (3), получим:

$$\int_{\Sigma} z_1 d\bar{u}_1 d\sigma = \int_{\Sigma} z_0 dr d\sigma - \int_{\Sigma} z_1 dr d\sigma, \quad (4)$$

которое является интегральным энергетическим уравнением состояния равновесия коленчатого вала с трещиной. Интегрируем левую и правую части уравнения (4):

$$\int_{\Sigma} z_1 d\bar{u}_1 d\sigma = \int_{-a}^a dx \int_0^{\frac{b}{2} \sqrt{1-x^2}} \frac{z_1 (t/2 - y)}{t/2} dy = z_1 ab \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{3} \frac{b}{t} \right) = P_i; \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
& \int_{\sigma} \sigma_y dr dz - \int_{\sigma} \sigma_l dr dz = \int_{-(a+dr_1)}^{(a+dr_1)} dx \int_0^{\frac{b+dr_2}{b+dr_1} \sqrt{(a+dr_1)^2 - x^2}} \sigma dy - \\
& - \int_{-a}^a dx \int_0^{\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}} \sigma_l dy = \frac{2}{3} G \left[(a + dr_1) + \frac{\sigma_{s1} - \sigma_l}{G} \right] \times \\
& \times \left[(b + dr_2) + \frac{\sigma_{s1} - \sigma_l}{G} \right] - 2G \left(\frac{a + dr_1}{b + dr_2} \right) b \left[\frac{(b + dr_2) + a}{2} \right]^2 + \\
& + 2G \left(\frac{a + dr_2}{b + dr_2} \right) \frac{ba^2}{3} - \frac{2}{3} Gba^2 - \frac{ab}{\pi} (\sigma_{s1} - \sigma_l) = P_0, \quad (6)
\end{aligned}$$

где G — градиент напряжения σ_0 , а остальные обозначения даны на рис. 2а.

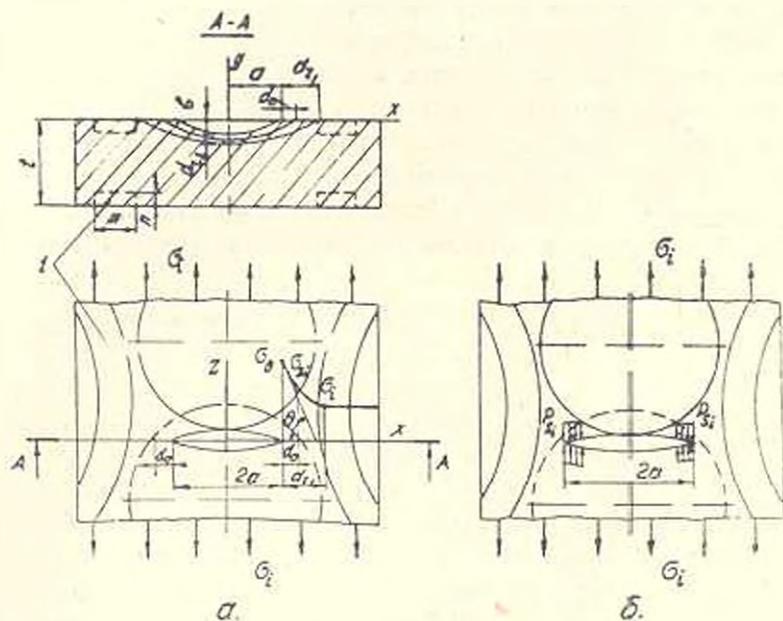


Рис. 2. а) Схема для расчета предельной нагрузки; б) схема эквивалентной замены действия закаленных участков.

Стриктерное усилие, создаваемое закаленными участками, определено, исходя из механических свойств этих участков:

$$P_{ст} = 0,8 \int_F \sigma_{s(3)} d\bar{u}_l dz - \int_F \sigma_l d\bar{u}_l dz = (0,8\sigma_{s(3)} - \sigma_l) \frac{m\pi}{3} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2a}{3t} \right), \quad (7)$$

где $F = m\pi$ — площадь сечения закаленного участка (рис. 2а).

Уравнения (5) — (7) позволяют рассчитать предельную нагрузку для коленчатого вала с закаленными щеками по условиям:

а) равновесия трещин —

$$P_s = P_q; \quad (8)$$

б) торможения трещин —

$$P_q = P_{ст}. \quad (9)$$

Решение уравнений (5) — (9) реализовано по программе INT на ЭВМ ЕС 1020. Результаты расчетов для коленчатого вала двигателя Д-240 показывают (табл. 1), что максимально допустимая длина трещины, тормозимая стрингерным усилием упрочненных участков, получается при $M_k = 2400 \text{ Нм}$. При $M_k > 2400 \text{ Нм}$ с учетом пластической зоны около вершины, трещина выходит на переходные от незакаленного к закаленному металлу участка и создает предпосылки к разрушению упрочненного коленчатого вала.

Таблица 1

Нагибающий момент M_k , Нм	Напряжение в рассматриваемом сечении σ_s , МПа	Стрингерное усилие $P_{ст}$, кН	Длина стабилизированной трещины a , мм
1600	133	31,2	19
1800	150	30,5	24
2000	167	29,9	27
2200	183	29,3	29
2400	200	28,6	31
2600	217	28,1	33

Упрочняющее действие закаленных участков оценим заменой их действия эквивалентными стрингерными усилиями P_{st} , распределенными по длине приращения трещины (рис. 2б). Коэффициент интенсивности напряжений, учитывающий действие закаленных участков, можно оценить непосредственно через комплексные потенциалы напряжений:

$$K_{II} = 2 \sum \frac{p_{s_i}}{a_i} \sqrt{\pi a_i}. \quad (10)$$

Условие (2) позволяет учесть влияние неоднородности в окрестностях трещины, вызванной наличием стрингерных усилий, и сохранить постановку задачи в однородной форме. Коэффициент интенсивности напряжений, полученный без учета влияния упрочнения, равен:

$$K_0 = \sigma_s \sqrt{\pi a_i}. \quad (11)$$

Учитывая, что усилие p_{s_i} направлено противоположно напряжениям σ_s , действительный коэффициент интенсивности напряжений в вер-

шине трещины, которая образовалась и развивается в закаленном участке щеки коленчатого вала, будет иметь вид:

$$K_i = K_j - K_{jz}. \quad (12)$$

Зависимость (12) поясняет упрочняющее действие закаленных участков щек — стрингеры упрочненных волокон препятствуют росту трещины, увеличивая сопротивляемость материала их развитию при приближении к закаленным участкам, т. е. по мере накопления повреждений эффект торможения возрастает ($K_i < K_j$). Подобная модель торможения роста трещины учитывает лишь механический эффект процесса, вызванный усилиями p_{ij} . При статическом нагружении, когда окончательному разрушению деталей предшествует сравнительно малое приращение начальной трещины, эффект торможения незначительный. Этот эффект сильнее проявляется в условиях циклического нагружения закаленных деталей машин, в которых возникновение усталостных трещин наблюдается на ранних стадиях циклического воздействия напряжений и процессе избирательного развития трещины.

Изучение кинетики усталостных трещин осуществлено на серийных и упрочненных коленчатых валах при перенапряжении, превышающем на 20% предел выносливости серийного вала, а оценка сопротивления усталости сопоставляемых коленчатых валов произведена по среднeverоятным значениям пределов выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ и их среднеквадратичным отклонениям $s_{\sigma-1}$ (рис. 3 и табл. 2) [5].

Таблица 2

Марка двигателя	Материал коленчатого вала	Вид упрочняющей технологии	$\bar{\sigma}_{-1}$ МПа	$s_{\sigma-1}$ МПа
Д-240	Сталь 45Х	серийный закалка щек	137	7
			180	3
Д-240	Сталь 40ХГНМ Сталь 40Х2АФЕ	по серийной технологии	170	7
			180	7
ЗИЛ-130	Сталь 45	серийный закалка щек	103	4
			159	3
А-41	Сталь 55	серийный закалка щек	122	10
			153	5
ЗМЗ-24	Чугун ВЧ50-2	серийный закалка щек	101	3
			134	2

На рис. 3 представлены зависимости $K_j - N$, полученные расчетно-экспериментальным путем для сопоставляемых коленчатых валов, и дана графическая интерпретация уравнения (12). На указанном уровне перенапряжения серийный коленчатый вал разрушается, примерно, при $N = (0,7 - 0,9) 10^6$ циклов, в то время, как для упрочненного коленчатого вала при $N > 10^6$ происходит стабилизация усталостной трещины (горизонтальный участок кривой 2), т. е. по мере накопления повреждений возрастает значение K_{jz} , характеризующее действие закаленных участков, что приводит к торможению усталостной трещины.

Из табл. 2 следует, что применение закалки шек для различных типов коленчатых валов позволяет повысить их предел выносливости на (27—55) % и не уступает по эффективности применению таких сталей, как 40ХГНМ и 40Х2АФЕ. Определены также оптимальные параметры упрочненных участков, обеспечивающие указанное повышение сопротивления усталости валов: глубина закалки (3—4) мм; твердость (50—55) HRC; микроструктура в виде мелко- и среднегальчатого мартенсита; расстояние упрочненных участков от коренных и шатунных шеек (2—4) мм. Это обеспечивается при нагреве до $t_{II} = 850-890^\circ\text{C}$, скорости охлаждения $v_{\text{зам}} = 100-150^\circ\text{C}/\text{с}$ и температуре самоотпуска $t_s = 180-220^\circ\text{C}$.

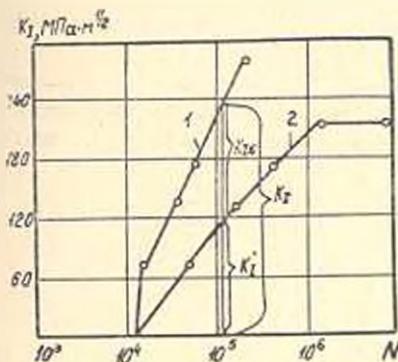


Рис. 3. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений серийного (1) и упрочненного (2) коленчатых валов от циклической долговечности N .

Предложенные условия (2) и (4) представляют собой критерия оценки работоспособности коленчатого вала с усталостной трещиной, которые свидетельствуют об эффективности метода упрочнения опасного сечения шек закаленными участками. На основе проведенного исследования разработаны упрочняющая технология и конструкция закалочного станка для упрочнения шек коленчатых валов в массовом производстве, применение которых даст определенный экономический эффект.

ИНДМАШ АН БССР,
ИПО «Армстанок»

29. IV. 1984

Ս. Գ. ԿՐԱՎՉՈՒԿ, Վ. Ա. ԶԻՄԻՆՅԿԻ, Մ. Դ. ՍՏԱԿԱՆ, Գ. Դ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

ՄԿԱԶԵՎ ԼԻՍԵՆՆԵՐԻ ԿՈՂԵՐԵՍՆԵՐԻ ՎՐԱ ՀՈԳՆԱՄԱՅԻՆ ՃԱՔԵՐԻ
ԿԻՆԵՏԻԿԱՅԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Դիտարկվում է ծնկաձև լիսեններում հոգնաճալին ճաքերի աճի վրա ներդրած մի եղանակ, որը կախնում է կողերեսների ծայրամասային հատվածների՝ բարձր հաճախականության հոսանքներով ամրացման մեջ:

Ուսումնասիրված է հողնածային ճաքերի աճի կինետիկան և կատարված են ամրացված ու շարժացված կողերի հետ կոնտակտի ծնկաձև լիսեռների համեմատական հողնածային փորձարկումներ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Фиксель В. М. Физические основы торможения разрушения. — М.: Металлургия, 1977.— 360 с.
2. А. с. № 812839 (СССР). Способ местной поверхностной закалки коленчатых валов /С. П. Кравчук, В. А. Зимбицкий и др.— Оpubл. в Б.И., 1981, № 10, с. 25.
3. Кравчук С. П., Зимбицкий В. А., Ивандиқоа М. П., Кукареко В. А. Повышение усталостной прочности коленчатых валов закалкой шек.— Автомобильный транспорт, 1978, № 9, с. 35.
4. Композиционные материалы. Разрушение и усталость /Под ред. Л. Броутмана.— М.: Мир, 1978 — 484 с.
5. Зимбицкий В. А., Кравчук С. П., Петрося Г. Д., Сидуренко С. В. и др. Ускоренные стойковые испытания деталей тракторных двигателей.— В кн.: Мат. Респ. конф. по повыш. надежн. и долговечн. маш. и сооруж. Киев: Наукова думка, 1982, ч. 2, с. 11—12.