

**ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**  
**ФАКУЛТЕТ ГОРСКА ПРОМИШЛЕНОСТ**  
**КАТЕДРА МАШИНОЗНАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА**  
**ПРОИЗВОДСТВОТО**

---

**доц. д-р СТЕФАН ХРИСТОВ СТЕФАНОВ**  
машинен инженер и инженер-математик

**ПРИНОСИ**

на дисертационния труд

**ИНТЕГРИРАНЕ НА ДИФЕРЕНЦИАЛИТЕ НА УМОРАТА**  
**(ИДУ) ЗА ОЦЕНКА НА ДЪЛГОТРАЙНОСТТА ПРИ**  
**ВСЯКАКВО ПРОМЕНЛИВО НАТОВАРВАНЕ**

представен за присъждане на научната степен  
„доктор на науките”

София, 2011 г.

**СЪДЪРЖАНИЕ**

Научни приноси – стр. 3

Научноприложни приноси – стр. 17

Приложни приноси – стр. 19

Тъй като цялото изложение в дисертационния труд е напълно оригинално и различно от всички съществуващи изследвания по проблема за оценка на уморната дълготрайност, списъкът на заявените приноси е неизбежно дълъг. Направен е опит за по-малко на брой по-обща формулировка на приносите (в курсив), последвани от разбивки. Същевременно следващото изложение неизбежно се превръща в една синтезирана форма на представяне на предлагания ИДУ-метод.

Междувременно по повод приносите се заявява, че всеки друг изследовател, който под една или друга форма вече експлоатира или ще експлоатира идеята ИДУ (включително в шестмерно координатно пространство на компонентите на променливо обемно напрегнато състояние), следва да признава нейния оригинален произход и интелектуалната собственост на автора върху нея.

## НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. *Разкрито е ново, оригинално научно направление, коренно различно от съществуващия циклов подход в науката за дълготрайността при умора на материалите, наречено „интегриране на диференциалите на умората” (ИДУ). Досегашното понятие цикъл на уморното натоварване не е основно, а частно. В основата на ИДУ е понятието диференциал на натоварването, върху който се търси диференциал на (повреждането от) умората. Предлага се всъщност съвсем различна концепция и стратегия за решаването на проблема за дълготрайността при всякакво уморно натоварване.*

1.1. Формулирана е (във въведението и по-нататък) нова, оригинална идея-концепция: да се проследяват диференциалите  $ds$  (малките крайни разлики  $\Delta s \sim ds$ ) на натоварването (напрягането), като за всеки нов появяващ се диференциал  $ds \sim \Delta s$  се изчислява диференциал на умората (уморното повреждане)  $dD \sim \Delta D$ ; дълготрайността се изчерпва, когато сумата (интегралът) от диференциалите на умората достигне определена критична стойност.

1.2. Разкри се, че концепцията ИДУ е коренно различна от досегашния т.нар. циклов подход в науката за умората на материалите, където променливостта на натоварването се свързва единствено с близкото до ума понятие цикъл на натоварването. При ИДУ променливостта на натоварването се въведе като поява на диференциал  $ds \sim \Delta s$  за диференциал на времето  $dt \sim \Delta t$  при текущ момент  $t$ . Това представлява съвсем друг начин на мислене, основан на диференциалния и интегралния анализ. Той е в съответствие с постиженията на съвременните науки, в които се прилага диференциалното и интегралното смятане (по този повод се написа трактатът за диференциалите и интегралите във въведението в дисертационния труд).

1.3. Направена е (в подглава 1.5) оценка на съвременното състояние на изследванията на уморната дълготрайност (преди намесата на ИДУ). Стига се до генерален извод, че проблемът за дълготрайността няма общо и единно решение. Понятието цикъл на натоварването е изиграло своята прогресивна роля при простото циклично натоварване, представяно само с една осцилограма  $s(t)$ , в която периодично се повтаря една вариация между  $s_{\min}$  и  $s_{\max}$ . Но при усложняване на натоварването и при опитите да се продължи с начина на мислене, основан на ограниченото и частно понятие цикъл, не се стига до ясен, логичен е единен метод към оценката на

дълготрайността при всякакво (общо) натоварване. Вместо това се стига до многобройни критерии за дълготрайност и разпиляване на усилия в голям мащаб.

1.4. Разкри се къде най-вече се проваля начинът на мислене с понятието цикъл: в двумерно и тримерно координатно пространство на произволно взаимно изменение на компонентите на т.нар. общо или всякакво натоварване (фиг. 1.1-3б) може и въобще да няма точка на обръщане или друг признак за цикъл. Понятието цикъл е приложимо при само една осцилограма (т.е. при т.нар.  $r$ -натоварване). Това е първопричината да се правят всякакви опити да се редуцират повече от една осцилограми до една-единствена и в нея да се търсят цикли. На фона на многобройните изследвания за броене на цикли в една нециклична осцилограма, ИДУ изненадващо показва, че всичко това не е наложително.

*2. Разкри се, че големият научен и научноприложен проблем за дълготрайността при умора на материалите е общо и единно решим тъкмо чрез концепцията ИДУ в съответствие със съвременните достижения в численото интегриране на всякакви диференциални уравнения в крайни разлики или крайни елементи с помощта на съвременните компютри, при всякакви интеграционни условия. В днешно време вече е възможно натрупаният световен опит от цикловия подход да се пренасочи към ИДУ.*

2.1. Разкри се (във въведението и подглава 1.5), че за оценка на уморната дълготрайност при общо (най-сложно) натоварване трябва да се ползва основното предимство на диференциалното и интегралното смятане – универсално интегриране на диференциално уравнение при всякакви (и най-сложни) интеграционни условия. Това означава, че директно (без търсене на цикли, декомпозиция на натоварването и др.) могат да се интегрират диференциалите  $dD$  по общ и единен начин при всякакви осцилограми  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_y(t)$  и  $\tau_{xy}(t)$ , които просто влизат в ролята на произволни интеграционни условия.

2.2. Разкри се (във въведението и по-нататък), че концепцията ИДУ не би могла да се реализира на дело преди компютърната ера, щом осцилограмите са повече от една, тъй като трябва да се интегрира числено с малки крайни разлики. Съответно идеята ИДУ дойде като плод на съвременното компютърно мислене. Иначе същата идея е могло да се реализира и без компютри, но само при една нециклична осцилограма.

2.3. Осъществи се (чрез целия представен труд) приемственост от натрупания световен опит от цикловия подход. Този опит въобще не се отрича от ИДУ, а напротив – използва се, както следва. На вход в ИДУ са основните традиционни характеристики на дълготрайността – криви на умора при циклични  $r$ -натоварвания с различни стойности на  $k$ . С други думи, на вход са всички досегашни знания и критерии във връзка с такива криви на умора. На вход могат да бъдат и всякакви други достижения на цикловия подход при частни случаи на непропорционални натоварвания (вж. също принос 13.4). ИДУ фактически хвърля мост между всички несъпоставими знания и критерии при различни специфични натоварвания, използвайки ги по друг начин при всякакво (общо) натоварване.

3. *Постави се в (подглава 1.6) за пръв път и се реши (в подглава 2.1) първата възникваща пред ИДУ задача: при произволни и непропорционални осцилограми  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_y(t)$  и  $\tau_{xy}(t)$  как да се предефинира вариантният диференциал  $ds$  от координатното пространство  $\sigma_x$ - $\sigma_y$ - $\tau_{xy}$  (фиг. 1.1-3б) в диференциал  $ds$ , инвариантен спрямо осите  $x$  и  $y$ . Генерира се идеята за трансформиращата елипса. Инвариантният диференциал  $ds$  се оказва в новоразкрито специално тримерно пространство  $\sigma'$ - $\sigma''$ - $d\tau$ , където  $\sigma'$  и  $\sigma''$  са главните напрежения, а третото измерение  $d\tau$  е безкрайно малко. В това тримерно пространство, с прибавяне на всеки следващ инвариантен диференциал  $ds$ , се описва инвариантна траектория на натоварването. Инвариантният диференциал  $ds$  има две компоненти в равнината  $\sigma'$ - $\sigma''$ , а третата му компонента  $d\tau$  е перпендикулярна на равнината  $\sigma'$ - $\sigma''$ . Тази трета компонента отчита въртенето на главните направления и е най-интересна. Разкритият инвариантен диференциал  $ds$  е плод на единствено възможна логика. Той доведе до нова терминология относно видове уморни натоварвания.*

3.1. Направен бе оригинален диференциално-геометричен анализ, който разкри трансформиращата елипса и доведе до формулирането на  $ds$  в новото координатно пространството  $\sigma'$ - $\sigma''$ - $d\tau$ . Съществен момент в анализа е идеята за отчитане на въртенето на главните направления, която прояви третата компонента  $d\tau$  на  $ds$ , перпендикулярна на равнината  $\sigma'$ - $\sigma''$ . А в самата равнина  $\sigma'$ - $\sigma''$  се въведоха компонентите  $ds_r$  и  $ds_c$  на  $ds$ :  $ds_r$  бе наречен радиален диференциал, а  $ds_c$  – окръжностен диференциал. Същевременно се разкри физическият смисъл на диференциалите  $ds$ ,  $ds_r$ ,  $ds_c$  и  $d\tau$ .

3.2. Оттам възникнаха нови термини за разкрити важни, характеристични, базисни уморни натоварвания: (чисто)  $r$ -натоварване (радиално натоварване, пропорционално или еднокомпонентно) – само с диференциали  $ds_r$ , (чисто)  $c$ -натоварване (окръжностно натоварване, непропорционално, без въртене на главните направления) – само с диференциали  $ds_c$ , и (чисто)  $d\tau$ -натоварване – само с диференциали  $d\tau$ , при което главните направления се въртят, а главните напрежения остават постоянни. Въведоха се траекторийни отношения  $t_r$ ,  $t_c$  и  $t_\tau$ , които при трите чисти базисни натоварвания са  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$  и  $(0, 0, 1)$ . Всяко смесено натоварване е с  $t_r < 1$ ,  $t_c < 1$  и  $t_\tau < 1$ .

3.3. Разкри се, че наред с инвариантното пространство  $\sigma'-\sigma''-d\tau$  на напрежения, ИДУ може да се разработва и в инвариантното пространство  $\varepsilon'-\varepsilon''-d\gamma$  на деформации, както и в двумерни пространства при само две ненулеви осцилограми. Дисертационният труд се ограничи в пространството  $\sigma'-\sigma''-d\tau$  при двумерно налягане, но възможността да се експлоатира идеята ИДУ и в другите споменати пространства, както и в шестмерни пространства по аналогичен начин при тримерно налягане, е също в обхвата на заявената интелектуалната собственост.

4. *Върху диференциал  $ds_r$  се въведе (в подглава 2.2) диференциал на умората  $dD_r = R_r ds_r$  и така се разкри ново основно понятие: интензивност на повреждането при  $r$ -натоварване – производна  $R_r(s) = dD_r(s)/ds_r$  на функция на повреждане  $D_r(s)$  с аргумент  $s$  като разстояние от  $ds_r$  до координатното начало в равнината  $\sigma'-\sigma''$ , при дадено  $k = \sigma''/\sigma'$ . Възникна и се реши (в подглава 2.3) задачата за определяне на  $R_r(s)$  от т.нар. входен  $R_r$ -прототип по такъв начин, че ИДУ да възпроизвежда една зададена крива на умора при циклични  $r$ -натоварвания с една и съща стойност на  $k$ . След това възникна и се реши (в подглава 2.4) задачата за определяне на  $R_r$  в цялата равнина  $\sigma'-\sigma''$  така, че ИДУ да възпроизвежда две и повече зададени криви на умора от съответни  $R_r$ -прототипи при циклични  $r$ -натоварвания с различни стойности на  $k$ . При това понятието граница на умора се замести (в раздел 2.7.7) от по-общото понятие за гранична линия  $L_r$ , която загражда  $L_r$ -област с  $R_r = 0$  (област на неповреждане от диференциали  $ds_r$ ) в равнината  $\sigma'-\sigma''$ .*

4.1. Разкри се, че теоремата на Нютон-Лайбниц дава забележителна възможност за определянето на интензивността  $R_r(s)$ : изведе се формулата (2.3.2-1) за нея.

4.2. Разкри се, че традиционното пречупване на крива на умора при граница на умора означава намеса на голям импулс (теоретично безкрайно голям) в интензивността  $R_r$ , което проявява пречупването като некоректна идеализация. Въпреки това се разработи възможността за ИДУ да възпроизвежда задавана крива на умора като пречупена в т.нар. режим пречупване или импулсен режим. Тогава  $R_r$ -прототипът съвпада със задаваната крива на умора. Но като основен, по-логичен, и като ново понятие се заложи режим изглаждане (гладък режим): ИДУ възпроизвежда задавана плавно завиваща крива на умора. Тогава  $R_r$ -прототипът не съвпада точно със задаваната крива на умора – тя завива плавно над него. Изведе се нейното уравнение (2.3.4-5).

4.3. Постигна се решение на задачата за определянето на  $R_r$  в цялата равнина  $\sigma'-\sigma''$  чрез апроксимиране на линиите на еднакви дълготрайности при циклични  $r$ -натоварвания при различни стойности на  $k$  с намеса на елиптични дъги. Така се обхващат всякакви критерии за линиите на еднаква дълготрайност. Изведоха се нелеки уравнения за получаване на  $R_r$  чрез числени последователни приближения: уравнението (2.4.7-5) и после уравнението (4.1.9-7), което се предхожда от няколко други уравнения.

4.4. Новият вид област с  $R_r = 0$  бе дефинирана като заградена от линия  $L_r$  на еднаква дълготрайност  $N_r$  цикъла от  $R_r$ -прототипи в гладък режим, или заградена от линия  $L_l$  на еднаква дълготрайност  $N_l$  цикъла в импулсен режим. Съответно се намесват новите термини  $L_r$ -област на неповреждане, заградена от гранична  $L_r$ -линия, и  $L_l$ -област на неповреждане, заградена от гранична  $L_l$ -линия. Числото  $N_r$  в гладък режим или числото  $N_l$  в режим пречупване се задава за всяко  $k$  вместо граница на умора. Задават се също проходните точки и наклоните на входните  $R_r$ -прототипи.

4.5. Решиха се (в подглава 4.1 в продължение от подглава 2.4) всички математически въпроси за осъществяване на алгоритмични процедури по пресмятането на диференциала на умората  $dD_r = R_r ds_r$  щом  $ds_r$  е извън  $L_r$ -областта (или  $L_l$ -областта). В (непрепоръчвания, но допустим) импулсен режим към натрупваното повреждане се добавя внезапна прибавка, щом траекторията пресича линията  $L_l$ .

5. *Върху диференциал  $ds_c$  се въведе диференциал на умората  $dD_c = R_c ds_c$  и така се разкри втори вид интензивност на повреждането –  $R_c = dD_c/ds_c$  при  $c$ -натоварване. Разви се (в подглава 2.5) идея за определяне на  $R_c$  в цялата равнина  $\sigma'-\sigma''$ , която намеси аспекти, неразкрити преди в изследванията чрез цикловия подход. Затова, на сегашния етап и следвайки логиката на изграждането на теорията на ИДУ, се въведоха*

условни  $R_c$ -прототипи. Те са аналогични на  $R_r$ -прототипите и така интензивността  $R_c$  се залага в съпоставка с  $R_r$ . Въведе се осреднено за равнината  $\sigma$ - $\sigma'$  отношение  $f_c = R_c/R_r$ . То влиза в ролята на емпиричен коефициент на чувствителност на материала към непропорционални  $s$ -натоварвания в сравнение с  $r$ -натоварвания.

5.1. Изведе се диференциално уравнение (2.5.1-1) за  $R_c$  с намесата на въпроси, за решаването на които по света няма изследователски опит. Съответно се генерираха идеи за нови видове изследвания, които биха поставили съществуващите критерии за дълготрайност в нова ситуация при  $s$ -натоварване.

5.2. Интензивността  $R_c$  се заложи по същия начин, както  $R_r$ : чрез (условни)  $R_c$ -прототипи. Обоснова се очакване, че  $R_c \geq R_r$  и съответно  $f_c \geq 1$ , като при чисто  $s$ -натоварване е възможно  $f_c$  да е значително над 1. Колко би се получил емпирично този коефициент на чувствителност към непропорционалност на натоварване с неподвижни главни направления е нов, предизвикващ интерес въпрос.

6. Върху диференциал  $d\tau$  се въведе диференциал на умората  $dD_\tau = R_\tau d\tau$  и така се разкри трети вид интензивност на повреждането –  $R_\tau = dD/d\tau$  при  $d\tau$ -натоварване, т.е. при постоянни главни напрежения по въртящи се главни направления. Това натоварване (подглава 2.6) дойде като откритие, благодарение на гледната точка на ИДУ. То ще постави на изпитание всички съществуващи критерии за дълготрайност. Затова се апелира към провеждане на изследвания с такова натоварване в лаборатории, които могат да го осъществят. Разви се идея за определяне на  $R_\tau$  в цялата равнина  $\sigma$ - $\sigma'$ . Но поради липсата на съответни изследвания, въведоха се (отново) условни  $R_\tau$ -прототипи, аналогични на  $R_r$ -прототипите. Така интензивността  $R_\tau$  се залага (пак) в съпоставка с  $R_r$ . Въведе се осреднено за равнината  $\sigma$ - $\sigma'$  отношение  $f_\tau = R_\tau/R_r$ . То влиза в ролята на емпиричен коефициент на чувствителност на материала към въртене на главните направления.

6.1. Разкри се (в раздел 2.6.1) истинският смисъл на експеримента на Финдли и съавтори с въртящ се диск преди половин век като единствен експеримент с (чисто)  $d\tau$ -натоварване, макар и с ограничени възможности.

6.2. Предложи се (в раздел 2.6.2) друга техническа реализация на  $d\tau$ -натоварване въз основа на разкритата елиптична вариантна траектория на  $d\tau$ -натоварването.



6.3. Изведе се уравнение (2.6.3-3) за интензивността  $R_\tau$  при предпоставка, че се знае експериментална дълготрайност от  $d\tau$ -натоварване.

6.4. Разкри се (в разделите 2.6.5 и 2.6.6)  $d\tau$ -натоварването като максимизиран случай в сравнение с други случаи на „по-слаби“ натоварвания. Сравнението не е в полза на концепцията за една критична площадка и поставя на изпитание всички съществуващи критерии за дълготрайност.

6.5. Наред с въвеждането на (условни)  $R_\tau$ -прототипи в сравнение с  $R_r$ -прототипите се обоснова очакване, че  $R_\tau \geq R_r$  и съответно  $f_\tau \geq 1$ . При това е възможно  $f_\tau$  да е значително над 1. Колко би се получил емпирично този коефициент на чувствителност към въртене на главните направления при (чисто)  $d\tau$ -натоварване е следващ нов, предизвикващ интерес въпрос.

7. Предлага се (в подглава 2.7) и се обосновава основен вариант за формула за  $dD \sim \Delta D$  при какво да е смесено натоварване, с едновременна поява на  $ds_r$ ,  $ds_c$  и  $d\tau$ . Формулата има вида  $R_r(ds_r^2 + f_c^2 ds_c^2 + f_\tau^2 d\tau^2)^{1/2} \sim R_r(\Delta s_r^2 + f_c^2 \Delta s_c^2 + f_\tau^2 \Delta \tau^2)^{1/2}$ . Тази формулировка дава привлекателна възможност да се използват традиционните криви на умора при циклични  $r$ -натоварвания и за оценка на дълготрайността при всякакво непропорционално натоварване, благодарение на коефициентите  $f_c$  и  $f_\tau$  за чувствителност на материала към непропорционалност на натоварването. Постави се въпросът за изграждане, разширяване и уточняване на емпирична банка данни за  $f_c$  и  $f_\tau$  в резултат на ИДУ-верификации. От тази банка подходящо се избират стойностите на  $f_c$  и  $f_\tau$  при всяко ново приложение на разработения ИДУ-метод. Наред с  $f_c$  и  $f_\tau$  в банката данни ще се намесват още параметрите  $N_c$  и  $N_\tau$  в отношения с  $N_r$ . Те определят в равнината  $\sigma$ - $\sigma'$  областите  $L_c$  и  $L_\tau$  на неповреждане от диференциали  $ds_c$  и  $d\tau$ . Тези области се заграждат от граничните линии  $L_c$  и  $L_\tau$  заместващи досегашни представи за граници на умора при непропорционални натоварвания.

7.1. Основното предимство на формулата на „смесения“ диференциал  $dD = R_r(ds_r^2 + f_c^2 ds_c^2 + f_\tau^2 d\tau^2)^{1/2}$  е, че при чисти  $r$ -натоварване,  $c$ -натоварване и  $d\tau$ -натоварване тя се редуцира до  $dD_r = R_r ds_r$ ,  $dD_c = R_c ds_c = f_c R_r ds_c$  и  $dD_\tau = R_\tau d\tau = f_\tau R_r d\tau$ . Предлаганият смесен диференциал води до конкретното авторово уравнение (2.7.5-1) за ИДУ-дълготрайността. Това означава, че други автори могат да предлагат и изследват в бъдеще и други формулировки за  $dD$ , като не е изключено да се разкрие и по-добър

вариант. В този смисъл по-горните изброени приноси са общи за концепцията ИДУ, а сега става дума за конкретни приноси при конкретизиране на предлагания метод ИДУ. По-долу лесно се открояват следващите конкретни приноси, а останалите са общи за концепцията ИДУ. Авторът си запазва правото и върху идеите за други конкретизираня на ИДУ, основани на формулите (2.7.2.1), (2.7.3.3), (2.7.4.1), (2.7.4.2) и подобни на последните две, но в координати-деформации.

7.2. При твърде сложния и необхватен механизъм на умората при всякакво (общо) натоварване е нереалистично да се залага, че коефициентите  $f_c$  и  $f_\tau$  при (чистите)  $c$ -натоварване и  $d\tau$ -натоварване биха оставали същите при всякакъв смесен диференциал  $dD$ . Затова съществен конкретен принос е предвидената банка емпирични данни за  $f_c$  и  $f_\tau$  отделно за първата практическа категория непропорционални натоварвания, с бъдещо включване на  $f_c$  отделно за втората категория, и на „чистите“  $f_c$  и  $f_\tau$  поотделно за чистите  $c$ -натоварване и  $d\tau$ -натоварване. „Чистите“  $f_c$  и  $f_\tau$  ще имат крайни стойности в интервали, в които варират „смесените“  $f_c$  и  $f_\tau$ . „Чистите“  $f_c$  и  $f_\tau$  ще се получат в бъдеще, ако изследователи в подходящи лаборатории възприемат гледната точка на ИДУ и започнат осъществяване на експерименти при чисти  $c$ -натоварване и  $d\tau$ -натоварване. Дисертационният труд ограничава конкретните си приноси върху първата практическа категория непропорционални натоварвания. Отделно, от публикацията [171], могат да се извлекат начални данни за  $f_c$  за втората практическа категория. А в том II продължава работата по разширяването и уточняването на емпиричната банка данни за ИДУ-параметрите.

7.3. Идеите за областите и линиите  $L_c$  и  $L_\tau$  представляват общи приноси. Тези области и линии биха могли да се формират от други автори по различни, по-сложни, но едва ли по-точни начини. В дисертацията линиите  $L_c$  и  $L_\tau$  са просто (условни) линии на еднакви дълготрайности  $N_c$  и  $N_\tau$ , до които се екстраполират  $R_c$ -прототипите и  $R_\tau$ -прототипите. Така само един задаван параметър  $N_c$  служи за формиране на цялата гранична  $L_c$ -линия, заграждаща  $L_c$ -областта с  $R_c = 0$ , и само един задаван параметър  $N_\tau$  служи за формиране на цялата гранична  $L_\tau$ -линия, заграждаща  $L_\tau$ -областта с  $R_\tau = 0$ .

8. *Разкри се също (в раздел 2.4.2 и др.), че концепцията ИДУ позволява прост и единен подход за отчитане на ненулеви статични (средни) напрежения  $\sigma_{x,m}$ ,  $\sigma_{y,m}$  и  $\tau_{xy,m}$  на осцилограмите  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_y(t)$  и  $\tau_{xy}(t)$ : от тях се изчислява еквивалентно статично напрежение  $\sigma_{екв,m}$  и с него се съгласуват входните прототипи на интензивностите на*

повреждането. В сравнение със  $\sigma_{\text{екв},m} = 0$ , ненулево  $\sigma_{\text{екв},m}$  вдига нагоре  $R_r$ -прототипите  $\sigma'_{\text{max}}-N$  (и увеличава показателя на наклона им) по добре известните зависимости от типа на Смит, при което интензивността  $R_r$  намалява. Натрупаният световен опит относно криви на умора по ненулеви статични нива на циклични  $r$ -натоварвания е пак приложим, но сега директно, без да възникват допълнителните концептуални усложнения и противоречия на цикловия подход заради  $s_{m,i}$  (т.нар. mean stress effect).

8.1. Разработено е съгласуването на входните прототипи с линия на еднакво еквивалентно статично напрежение  $\sigma_{\text{екв},m}$  в равнината  $\sigma'-\sigma''$ . Изборът на критерий за тази линия се оставя на ИДУ-потребителя според неговия опит. Могат да се намесват класическите критерии на Фон Мизес, Треска и Мор, или всеки друг емпирично усъвършенстван критерий. Но композирането на линиите на еднакви дълготрайности от елиптични дъги за целите на ИДУ асоциира също едно предложение – формулите (2.4.2-5) – (2.4.2-8): линията на еднакво  $\sigma_{\text{екв},m}$  се композира от елиптични дъги с участието на налични характеристики на статична якост на материала при различни стойности на  $k$ .

8.2. Когато не се разполага с експериментални криви на умора, съгласувани със  $\sigma_{\text{екв},m}$  за формиране на входните прототипи, залагането на хипотетични криви на умора се оставя на ИДУ-потребителя според неговия опит в зависимостите от типа на Смит. Но може да се предпочете и предложеното уравнение (1.2.2-1) за генериране на хипотетична крива на умора въз основа на едно средно решение между решенията по параболата на Гербер и правата на Гудман, считани за крайни.

8.3. При ИДУ, след като  $\sigma_{\text{екв},m} \neq 0$  е отчетено еднократно при входните прототипи, нататък влиянието му върху диференциалите  $dD$  върви автоматично. Докато при цикловия подход, при различните опити да се редуцират осцилограмите  $\sigma_x(t)$ ,  $\sigma_y(t)$  и  $\tau_{xy}(t)$  към една-единствена и да се търсят цикли в нея, възникват допълнителни концептуални усложнения и нарастващи противоречия относно това, как да се отчитат ненулевите  $\sigma_{x,m}$ ,  $\sigma_{y,m}$  и  $\tau_{xy,m}$ . Затова изследванията чрез цикловия подход са предимно за нулеви  $\sigma_{x,m}$ ,  $\sigma_{y,m}$  и  $\tau_{xy,m}$ . От литературното проучване въпросът за ненулеви  $\sigma_{x,m}$ ,  $\sigma_{y,m}$  и  $\tau_{xy,m}$  остана неясен дори за простия случай на въртеливо огъване с постоянно усукване (раздел 1.4.6). А там ИДУ нямаше проблем и се верифицира успешно (в подглава 5.8). В продължаващата работа в том II ИДУ пак дава приемливи изчислителни дълготрайности при налично  $\sigma_{\text{екв},m} \neq 0$ , докато един предложен циклов метод не успя.

8.4. Като се анализира цикловият подход (върху една осцилограма) от гледната точка на ИДУ, намесвайки понятието интензивност на повреждането, проявява се едно концептуално възражение срещу многото предлагани начини да се трансформират различните амплитуди  $s_{a,i}$  в зависимост от отчитаните различни средни напрежения  $s_{m,i}$ : от размах към размах тези начини правят всъщност прекъсвания (скокове) на физически непрекъсната функция интензивност на повреждането.

9. *ИДУ-начинът на мислене допринася (в раздели 1.3.4, 2.3.7, 2.7.6 и др.) за възприемане на реалния факт, че само историята на натоварването до текущ момент  $t$  влияе върху образуващия се диференциал на повреждането  $dD$  при нарастване на времето с  $dt$ , не и бъдещето на натоварването след момента  $t$ , което бъдеще „материалът не знае“. Във връзка с това цикловият подход допуска всъщност една нелогичност, наречена в дисертационния труд „парадокс на надничане в бъдещето“ на натоварването. Гледната точка на ИДУ насочва в по-логична посока мисленето за разгадаване на неразгадания механизъм на влиянието на текущо формиращи се статични напрежения, за отчитане на нелинейност на повреждането, за истинската интензивност на повреждането и т.н. При това възникват интересни и неразглеждани по-рано въпроси.*

9.1. Чрез ИДУ-начина на мислене се осъзнава, че процесът на натрупване на уморното повреждане трябва да се разглежда такъв, какъвто си е – установен и непрекъснат, диференциал след диференциал, отчитайки факта, че „материалът не знае“ бъдещето на натоварването, например че предстои точка на обръщане (в една осцилограма). Изследователят чрез цикловия подход е този, който допуска „надничането в бъдещето“ на натоварването, за да види точката на обръщане, т.е. кога ще свърши размахът, да се върне после в началото му, да формира амплитуда  $s_{a,i}$ , да я трансформира в зависимост от  $s_{m,i}$ , прекъсвайки по този начин функцията интензивност на повреждането, ненамесвайки въпроса колко е повреждането за част от размаха, и т.н. По-общо казано, изследователят предварително „надниква“ в една цяла нециклична осцилограма, образува цикли между точки на обръщане, случили се в различни моменти, включително между много раздалечени през други, и едва тогава оценява натрупаното повреждане. А то междуременно се е натрупало очевидно не според такива процедури на изследователя.

9.2. Предлаганият конкретен метод ИДУ също допуска „парадокса на надничане в бъдещето“, когато се иска да се знаят предварително  $\sigma_{x,m}$ ,  $\sigma_{y,m}$  и  $\tau_{xy,m}$ . Но посоката на мислене е по-логична. Всъщност и на този етап ИДУ потребителят може да процедира само според историята на натоварването до текущия момент  $t$ : да заложи при  $t = 0$  интензивност на повреждането както при нулеви статични напрежения и после да следи формираци се до  $t$  ненулеви статични напрежения  $\sigma_{x,m}(t)$ ,  $\sigma_{y,m}(t)$  и  $\tau_{xy,m}(t)$ . Но тук възниква интересният и незадаван досега въпрос какъв да бъде интервалът преди  $t$ , достатъчен за „запомняне и свикване“ на материала с установяващо се  $\sigma_{екв,m}$ ? На езика на цикловия подход при една осцилограма  $s(t)$ , въпросът е след колко предишни размаха материалът „запомня и свиква“ с установяващо се  $s_m$ ? А в самото начало на натоварването, колко е повреждането от първия размах? А от част от първия размах?

9.3. Предлага се (в раздел 2.7.6) най-общ поглед върху всички възможни аргументи на функцията интензивност на повреждането, свързани само с историята на натоварването и с текущия момент  $t$ . Показва се, че самото текущо натрупано повреждане  $D_{\Sigma}(t)$  може да бъде аргумент на интензивността, рекурентно предизвикващ нелинейност в развитието на повреждането, ако такава ще се отчита.

10. *Концепцията ИДУ се разви (в подглава 2.8) и в статистическа (вероятностна) интерпретация при всякакво случайно натоварване. Идеята за диференциалите  $ds$  и техните компоненти  $ds_r$ ,  $ds_c$  и  $d\tau$  просто и логично довежда до възможност за тяхно директно статистическо разпределение в мрежа или мрежи в подходящо ИДУ-пространство или ИДУ-равнина. Изведени са връзките между статистически честоти, респ. вероятностните характеристики на разпределението и интензивността на повреждането, въз основа на които може да се пресметне дълготрайността. Така отделно се разкри ново научно, статистическо и вероятно ИДУ-направление.*

10.1. ИДУ концептуално безпроблемно позволява статистическа и вероятностна интерпретация на съвместното действие на компонентите на многокомпонентно натоварването, като тази интерпретация се отнася до текущите (моментните) стойности на компонентите. Цикловият подход концептуално не може да постигне същото, защото той осъществява статистическо разпределение само на цикли

и амплитуди, а такива няма как да се дефинират в съвместното действие на компонентите.

10.2. В частност, при случайно  $r$ -натоварване (със само една осцилограма), когато цикловият подход въвежда разпределение на амплитуди, ИДУ процедира с едномерно разпределение на текущите стойности. Установени са връзки между двата вида разпределения. Те позволяват пренасяне на натрупания опит на вероятностния подход (като част от цикловия подход) към разпределения на вече текущи, а не амплитудни стойности.

11. *За целите на ИДУ, но с принос въобще към теорията на променливите напрежения и деформации извън ИДУ, се разви една оригинална диференциална теория, подсказана от идеята ИДУ и дефинирания диференциал  $ds$ . В рамките на въпросната теория се реши задачата за определянето на функцията  $\alpha'(t)$  (въртенето на главните направления), свързана със задачата за коректно определяне на функциите главни напрежения и деформации с коректно превключване на знаците  $\pm$  във формулите за тях.*

11.1. Във връзка с функцията  $\alpha'(t)$  и превключването на знаците  $\pm$  се намесиха нови понятия и оригинални интерпретации. Изведоха се, формулирани за първи път, три условия за превключване (раздели 2.4.4 и 4.1.2 – 4.1.4). Установи се необходимост от разделяне на вариантни елементи на по два поделемента. Реши се и самата подзадача за разделянето (раздел 4.1.5). А с решената задача за функцията  $\alpha'(t)$  се открива пътят за пълноценно приложение на ИДУ и при ортотропни материали.

11.2. Доказа се, че инвариантната траектория на главните напрежения (или на главните деформации) преминава от другата страна на оста  $\eta$ , само когато вариантната траектория точно пресича тази ос. Дори безкрайно малко отклоняване на вариантната траектория от оста  $\eta$  води до връщане на инвариантната траектория към същата страна на  $\eta$  (раздел 4.1.5).

12. *За частния случай на нециклично  $r$ -натоварване се изведе редуцираното ИДУ-уравнение (3.1.2-1) за дълготрайността  $N$ . То позволява пресмятане на  $N$  без явна намеса на диференциалите  $ds$ , а само въз основа на формулата на Нютон-Лайбниц. При това участва примитивната функция на повреждането  $D(s)$  и интервалът на неповреждане  $L_r$  (или  $L_l$ ). Така при само една нециклична осцилограма стана възможно*

*изчисляването на дълготрайността директно, без търсене и броене на цикли, изненадващо за развивания повече от един век циклов подход.*

12.1. Направи се (в подглава 3.2) теоретичен анализ, проявяващ какви сравнителни резултати за дълготрайността могат да се получават по ИДУ и по цикловия подход, представяван главно от метода на дъждовното стичане, и при какви условия.

12.2. Доказа се теоретично (в подглави 3.2 и 3.4), че ИДУ успешно „полага изпита” при само една осцилограма и може да оценява дълготрайността дори по-добре от цикловия подход в условията на неговите различни, спорещи версии.

13. *В крайна сметка развитата ИДУ-теория позволява нова стратегия, както следва. След като изглежда нереалистично, че някой от многото предлагани циклови критерии за дълготрайност ще се окаже общоприложим и общовалиден едновременно при всякакви конкретни непропорционални натоварвания от първата и втората категория, а също при неизследваните чисти  $s$ -натоварвания, и особено при неизследваните чисти  $d\tau$ -натоварвания, разкрити в дисертационния труд, и че при всякакви разнородни и многобройни верификации критерият едва ли ще дава  $(N_{\text{cmp}}/N_{\text{exp}})_{\text{средно}}$  достатъчно близо до 1, то: по-реалистично и по-практично изглежда (подглава 5.1) да се изхожда от  $(N_{\text{cmp}}/N_{\text{exp}})_{\text{средно}}$  достатъчно близо до 1, и оттам да се каналлизират изследванията към изграждането на общовалидна емпирична банка данни на сполучливи ИДУ-параметри. Една такава „обратна” стратегия е възможна само при ИДУ, тъй като сега дълготрайността  $N_{\text{cmp}}$  винаги може да се пресмята по единен и универсален начин при всякакви натоварвания.*

13.1. Дисертационният труд дава ново теоретично гледище и светлина, в която по-ясно се вижда вътрешно заложена неуспеваемост на всеки критерий за дълготрайност, щом се опитва да се пренесе понятието цикъл от една проста циклична осцилограма към три произволни и непропорционални осцилограми. Според теорията и начина на мислене от дисертационния труд винаги могат да се измерят случаи на натоварване (максимизиран и минимизиран, и др.), в които критерият ще се окаже или неприложим, или противоречащ. Няма циклов критерий, чиято приложимост и валидност да е доказана едновременно при първата и втората категория непропорционални натоварвания, също при най-общо натоварване с три произволни и

непропорционални осцилограми, а сега вече и при разкритите от ИДУ характеристични случаи на чисто  $c$ -натоварване и (особено) чисто  $d\tau$ -натоварване.

13.2. ИДУ-концепцията е винаги приложима за всякакви натоварвания, понеже е освободена от ограничаващото понятие цикъл на натоварване. Тя всъщност не представлява някакъв критерий за дълготрайност в смисъла, който се влага в това понятие. Тя дава начин за директно използване на интензивност  $R_r$  от циклични  $r$ -натоварвания за оценка на дълготрайност при всякакви нециклични  $r$ -натоварвания, а чрез предлаганите емпирични параметри  $f_c$  и  $f_\tau$  интензивността  $R_r$  става приложима и при всякакви непропорционални натоварвания. При това се разчита, че  $f_c$  и  $f_\tau$  изведени от условието  $(N_{\text{cmp}}/N_{\text{exp}})_{\text{средно}} \rightarrow 1$  поотделно за двете категории непропорционални натоварвания и за чистите  $c$ -натоварване и  $d\tau$ -натоварване, ще могат достатъчно надеждно да се избират от съответни изградени банки данни. Те ще са части на една общовалидна банка данни. В тях несъмнено ще се открият, макар и с разсейвания, определени закономерности на вариране на  $f_c$  и  $f_\tau$  в определени интервали. Такива закономерности и интервали ще се открият и за предложените параметри  $N_c$  и  $N_\tau$  в отношения към  $N_r$ , които също ще намират място в банките данни наред с  $f_c$  и  $f_\tau$ . Най-малкото се разкри, че областите на неповреждане  $L_c$  и  $L_\tau$  са по-близо до координатното начало, отколкото областта  $L_r$ . А дори и при несигурни данни за предложените ИДУ-параметри, в полза на сигурността винаги могат да се залагат завишени техни стойности.

13.3. Изборът на  $f_c$ ,  $f_\tau$ ,  $N_c$  и  $N_\tau$  от интервалите на вариране в банките данни осигурява тази гъвкавост и обща валидност на ИДУ, която липсва на съществуващите критерии. Това, че едни критерии се доказват при дадени конкретни случаи на непропорционални натоварвания, а са неприложими в други случаи, за които се предлагат други критерии, при ИДУ означава, че варират  $f_c$ ,  $f_\tau$ ,  $N_c$  и  $N_\tau$

13.4. При изграждането на общовалидна банка данни за ИДУ-параметрите  $f_c$ ,  $f_\tau$ ,  $N_c$  и  $N_\tau$  наред със залагането на емпирични стойности, може също да се използва всеки доказал се критерий с частна валидност при специфични непропорционални натоварвания. По оценяваната от такъв критерий дълготрайност и/или граница на умора ИДУ може да формира  $f_c$  и  $f_\tau$  и/или  $N_c$  и  $N_\tau$ .

13.5. „Обратната” стратегия е принципно невъзможна за кой да е циклов критерий поради специфичността на приложението му към конкретно натоварване.



Критерият не може да борави с избираеми общи параметри при всякакво натоварване от типа на ИДУ-параметрите  $f_c, f_{\tau}, N_c$  и  $N_{\tau}$ .

13.6. Не се изключва възможността други изследователи да разкрият и по-сполучливи общи ИДУ-параметри. Най-важният принос и ефект от дисертационния труд ще е канализиране на техните изследвания към ИДУ.

## НАУЧНОПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. *Решиха се (в глава 4) голям брой математически и алгоритмични задачи за компютърна реализация и приложение на авторовия метод ИДУ, които отново нямат съществуващи аналози и се поставиха за пръв път.*

1.1. Разработиха се математически а алгоритмично, докрай, заложените (в подглава 2.9) две системи за интерполация – тригонометрична и сплайнова. Те са вградени в софтуера на метода и при необходимост генерират автоматично  $n_i-1$  допълнителни ординати между всеки две последователни оригинални ординати на осцилограмите. ИДУ-потребителят може да задава подходящо число  $n_i$  за интерполация, в случай че оригиналните ординати са нарядко, може да избира по-подходящата за случая интерполация, и т.н.

1.2. Разработи се до докрай, с цел програмиране и приложение, новият математически апарат по образуването на елементите  $\Delta s$ . Въведе се обобщена координатна равнина  $X-Y$ , към която се прибавят перпендикулярните компоненти на елементите  $\Delta s$ . По този начин софтуерът на метода придоби възможност да работи както в координатното пространство  $\sigma'-\sigma''-\Delta\tau$ , така и в пространството  $\varepsilon'-\varepsilon''-\Delta\chi$ , а също с въвеждане както на три ненулеви осцилограми, така и на по-малко от три.

1.3. Решиха се докрай възникналите специфични математически и алгоритмични задачи относно условията за превключването на знаците  $\pm$  и осигуряването на непрекъснатостта на инвариантната траектория през оста  $\eta$ . Същевременно на ИДУ-потребителя се предостави и алтернативната опция да предизвика илюстративно прекъсване през  $\eta$ , което създава удобства в определени случаи на приложение на ИДУ. Освен това, наред с несвързването на елементите  $\Delta s_{xy}$  в равнината  $X-Y$ , което е опция по подразбиране, се осигури математически и алтернативната опция – свързване на елементите  $\Delta s_{xy}$ . Различните опции, както и

изборът на числото за интерполация  $n_i$ , дават възможност за допълнителен контрол на резултатите, за провеждане на по-отговорни изчисления в по-точен режим или обратно – за получаване на резултати на „чернова”, и др.

1.4. Обезпечи се математически и алгоритмично алтернативният импулсен режим (режим пречупване) при пресичането на гранична крива  $L_l$  (вместо  $L_r$ ) за случая, когато ИДУ-потребителят има съображения и предпочитания да ползва този режим.

1.5. Преодоляха се многото допълнителни математически и алгоритмични подробности относно: изследване на възможността да се получи и реши текущото елиптично уравнение (това бе и самостоятелна, оригинално поставена и решена задача, касаеща коректността на линиите на еднаква дълготрайност и оттам коректността на задаваните криви на умора); самото решаване на уравнението чрез последователни приближения по два метода, основен и резервен, специфично приложени за ИДУ; последващото изчисляване на съответната интензивност на повреждането; и др.

1.6. Решиха се концептуално и се обезпечиха математически и алгоритмично много допълнителни въпроси относно: състава на допълнителните и контролни резултати; съобщенията, които софтуерът дава в диалога с потребителя; организацията на графичния режим; и др.

*2. Създаден бе оригинален ИДУ-софтуер, наречен Елипса, след решаване на алгоритмични и програмистки проблеми с обем и сложност такива, каквито при други условия биха ангажирали цял екип математици и програмисти.*

2.1. Мина се през много проблеми заради липсата на съществуващ аналог, през различни варианти, усъвършенствания, намеса на нови програмни модули, тествания, преодоляване на алгоритмични клопки, и т.н. Създаването на софтуера се осъществяваше от само един човек, защото другите колеги искаха да видят първо резултати, а едва след това евентуално да подкрепят ИДУ. Така алгоритмичните и програмистки усилия отнеха сумарно около 30 години. Започна се преди 1980 г. с тогавашния алгоритмичен език Фортран 77 и се продължи с него. Тази дейност бе от типа на създаването на съвременните лицензирани програмни пакети за решения на диференциалните уравнения на теорията на еластичността и на други теории в крайни елементи, ангажирали екипи от високо квалифицирани математици и програмисти.

2.2. Софтуерът е доказано работещ. Интерфейсът му в сегашния му работен вид осъществява пълноценно диалога между ИДУ-потребителя и компютъра, но не е в

съвременна форма, предполагаща лицензиране. Затова софтуерът се предлага за свободно ползване. Обаче ако методът ИДУ, реализиращ се практически благодарение на този работен софтуер, „пробие” и се възприеме навсякъде по света, тогава важността на приноса „ИДУ-софтуер” ще нарасне рязко. Някъде по света ще се формира екип за създаване на съвременен лицензиран ИДУ-софтуер с последващ маркетинг. Който и екип да започне тази дейност, ще разполага с вече работещ аналог на алгоритъма, включително с аналог на графичния режим.

2.3. Предлаганият софтуер освобождава ИДУ-потребителя от необходимостта да познава в подробности изложената в дисертационния труд ИДУ-теория. Евентуални твърдения, че ИДУ-методът е нещо твърде математическо, сложно и неразбираемо (поради което по-добре да се стои на понятието цикъл), ще са неоснователни. Наистина, както и при ползването на популярните програмни пакети за моделиране чрез крайни елементи, предлаганият софтуер е просто една „черна кутия” с определено предназначение и с определен, ясен начин на функциониране (това е пояснено допълнително към следващия приложен принос 1.2). А какво точно става в „черната кутия”, какви немислими преди три-четири десетилетия числени решения се осъществяват сега компютърно, е друг въпрос, който не касае пряко потребителя.

## ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. *Написа се практическо ръководство (раздел 4.1.1, подглави 4.2 и 4.3), което позволява сравнително лесно овладяване и масово ползване на предлагания софтуер Елипса.*

1.1. Ръководството съдържа инструкции и демонстрации (упражнения) за приложението на ИДУ-метода чрез софтуера *Елипса*. То е необходимо кратко помагало, след изучаването на което ИДУ-приложението може да бъде масово, от всекиго, за всякакви входни осцилограми. За сравнение, използването на много от съществуващите циклови критерии е разбираемо само за техните автори, различно е за различни конкретни входни осцилограми, и всеки път води до написване на следващ научен труд, вместо до следващо рутинно конкретно приложение.

1.2. Ръководството разкрива ясно предназначението и начина на функциониране на софтуера *Елипса*, както следва (в общи щрихи). Задават се от два до

девет входни  $R_r$ -прототипа такива, че софтуерът възпроизвежда в гладък режим съответни задавани криви на умора при циклични  $r$ -натоварвания с различни стойности на  $k$ . В режим пречупване (импулсен режим) задаваните криви на умора влизат директно в ролята на входните  $R_r$ -прототипи. Задават се  $f_c$ ,  $f_{\tau}$ ,  $N_c$  и  $N_{\tau}$ . Всички данни дотук се наричат водещи (Leading Data) и се групират в т.нар. L-файл. А осцилограмите (Current Data) са в т.нар. C-файл. От тези два файла, въведени, излиза резултатът за дълготрайността.

1.3. Ръководството представя софтуера *Елипса* като състоящ се от две основни програми – *ЕлипсаТ* и *ЕлипсаS*. Обяснено е коя от двете при какви входни осцилограми е по-удобна за ползване. *ЕлипсаТ* е с тригонометрична интерполация и е предвидена главно за циклични осцилограми. Освен това тя, по заявка на потребителя, може да генерира автоматично синусоидални осцилограми при зададени ъгли на дефазация и други параметри. *ЕлипсаS* е със сплайнова (Spline) интерполация и е предвидена основно за дълги, нециклични или случайни осцилограми. *ЕлипсаТ* също може да се прилага за такива осцилограми в по-специфични случаи, като при необходимост се предхожда от една помощна програма, наречена *nv10*. Софтуерът *Елипса* съдържа и една допълнителна програма – *ЕлипсаС*, която замества *ЕлипсаS*, в случай че ИДУ-потребителят предпочита на компютърния екран да излизат не елементите  $\Delta s_{xy}$ , а само точки, съставлящи „облак” (Cloud).

1.4. Програмите се предлагат с диалог потребител-компютър както на български, така и на английски.

2. Създаде се отделна приложна компютърна програма, наречена *Интеграл* (раздел 3.1.3), която служи само при  $r$ -натоварване (при само една осцилограма). Тя е доста по-проста и за предпочитане пред софтуера *Елипса*.

2.1. Всеки, който прави сравнителни изследвания на различните методи за оценка на уморната дълготрайност при нециклично, в общност случайно  $r$ -натоварване, може да включи в сравненията и метода ИДУ, благодарение на простата за използване програма *Интеграл*.

2.2. По-специално, към програмата *Интеграл* ще проявят интерес колегите, ангажирани с многото изследвания, докладвани на регулярни конференции, под наименованието „Натоварване с променлива амплитуда” (VAL – Variable Amplitude

Loading). Интересът ще се дължи на факта, че програмата *Интеграл* е приложима при „Натоварване с променлива амплитуда”, но не борави с никаква амплитуда.

3. Приложи се ИДУ чрез програмата *Интеграл* за оценка на уморната дълготрайност на случайни  $r$ -натоварвания (еднокомпонентни), осъществени от полски изследователи. Получиха се най-добри резултати в сравнение с други, циклови методи.

3.1. Като един от най-компетентните познавачи на другите методи (вж. <http://www.pragtic.com/>) бе привлечен д-р Ян Папуга. Оказа се, че другите, циклови методи могат да дадат оценки на дълготрайността, близки до тези на ИДУ, само по случил критерий за трансформиране на амплитуди  $s_{a,i}$  в зависимост от  $s_{m,i}$ , докато такава зависимост се улавя автоматично от ИДУ без въобще да се търсят амплитуди.

3.2. Така експериментално наистина се потвърди теоретичното очакване, че интензивността на повреждането  $R_r(s)$ , респ. функцията на повреждането  $D_r(s)$ , получена от кривата на умора, т.е. от съответните циклични  $r$ -натоварвания със същото  $k$ , може да служи директно, без търсене на цикли чрез дъждовното стичане, за оценка на дълготрайността при случайно  $r$ -натоварване със същото  $k$ .

4. Получен бе начален вариант на емпиричната банка данни за ИДУ-параметрите  $f_c$ ,  $f_\tau$ ,  $N_c$  и  $N_\tau$  за първата практическа категория непропорционални натоварвания в резултат на първоначална адаптация и последвали пет верификации (в глава 5) по експериментални данни, добити от изследователи от Германия, Италия, Русия и България (и от Република Чехия – в продължаващи верификации извън дисертационния труд). С помощта на програмите *ЕлипсаТ* и *ЕлипсаS* бяха получени 49 изчислителни дълготрайности при доста разнообразни непропорционални натоварвания. Постигна се  $(N_{\text{cmp}}/N_{\text{exp}})_{\text{средно}} = 1,02$  все с  $f_c = 2$  и  $f_\tau = 3$  с изключение на петата верификация, където за стомана с доста по-малка статична якост се оказа  $f_c = f_\tau = 1$ . Потвърди се теоретичното очакване, че параметрите  $f_c$  и  $f_\tau$  ще варират в сравнително тесен интервал (1 – 3), следвайки определена закономерност, която ще ги прави удобни и надеждни при селекция. Откри се закономерност и в избора на  $N_c$  и  $N_\tau$  в сравнение с  $N_r$ .

4.1. Представената банка данни е начална и непълна, но е добра основа за следващи ИДУ-оценки на дълготрайност. За тях се очаква неточност, по-малка от два пъти ( $0,5 < N_{\text{cmp}}/N_{\text{exp}} < 2$ ). Тази неточност винаги може да се насочва в полза на сигурността чрез подходящо завишаване на четирите ИДУ-параметъра.

4.2. На този етап се оказва, че параметрите  $f_c$  и  $f_\tau$  са в зависимост само от (границата на) статичната якост на материала, без да се влияят от съществените разлики в натоварванията и пробните тела: за стомани  $f_c$  и  $f_\tau$  са 2 и 3 над  $R_m \approx 700$  МПа, а към  $R_m = 410$  МПа  $f_c$  и  $f_\tau$  са 1 и 1; чугунът във верификацията (1) показва  $f_c = 2$  и  $f_\tau = 3$ . За следващи ИДУ-приложения ще може да се интерполира съобразно изложените данни.

4.3. Потвърди се, че линиите  $L_c$  и  $L_\tau$  трябва да са по-навътре към координатното начало отколкото линията  $L_r$  (или  $L_l$ ). Това може да се осигури дори чрез равенствата  $N_c = N_\tau = N_r$ , но ако  $f_c > 1$  и  $f_\tau > 1$ . Иначе, в случай че  $f_c$  и  $f_\tau$  приближават 1, трябва  $N_c > N_r$  и  $N_\tau > N_r$ . Общо взето, ориентировъчно, засега могат да се препоръчат  $N_c$  и  $N_\tau$  от порядъка на  $10N_r$  с възможна грешка в полза на сигурността.

*5. Разкри се (в глава б), че уморните натоварвания в машините и съоръженията в горската промишленост са с такава сложност, поливариантност и комплексност, че отварят едно от най-широките полета за приложение и изява на ИДУ. Това се обуславя от спецификата при рязането и обработването на материала дървесина: създават се условия за всякакви променливи натоварвания, каквито не се срещат в много други видове машини и съоръжения. Съответно се създават условия за възникване на най-големи затруднения пред цикловите методи за оценка на уморната дълготрайност. Така ИДУ идва навреме и на място, тъй като тъкмо най-сложните натоварвания са в неговия обхват на приложимост.*

5.1. Разкри се, че при циркулярен вал ще става дума за изчисляване на умора при осцилограми  $\sigma(t)$  и  $\alpha(t)$  твърде сложни, доста специфични (несрещани в други машинни валове), нециклични, случайни и непропорционални. На практика, всеки автор на друг метод за оценка на уморната дълготрайност, като види осцилограмите на фиг. 6.2.3-2 в дисертацията, най-вероятно ще отклони покана да приложи метода си. А тъкмо при тези условия е валиден методът ИДУ и следователно необходим. Могат да се приложат знанията от целия труд, и основно от верификациите от глава 5.

5.2. Приложи се изчислителна схема, според която осцилограмата  $\sigma(t)$  на лентов банцигов трион ще се окаже с твърде сложни и случайни вариации. Те допълнително

ще се усложнят от намеса на вибрации и други динамични явления. Ще е съществено научно постижение, когато се стигне до финална и реална осцилограма на  $\sigma(t)$  в лентов банцигов трион. Тя ще е тъкмо много подходящ случай за приложение на ИДУ, следвайки верификацията в глава 3. Случаят може да стане класически в литературата по умора на материалите.