

ارائه فرمول جهت محاسبه تعداد سیکل شکست بر حسب ضخامت روکش گالوانیزه گرم در پدیده خستگی

کاظم رضا کاشی زاده^{۱*}، علیرضا ارغوان^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

۲- مربی، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* Kazem.kashyzadeh@gmail.com

چکیده

در این مقاله هدف پیش‌بینی تعداد سیکل شکست در قطعات آبکاری شده با روکش گالوانیزه گرم با ضخامت‌های مختلف نازک ابعادی در مقیاس میکرون است. به این منظور قطعات فولادی از جنس CK45 با استفاده از فرآیند آبکاری با ضخامت‌های ۱۳، ۱۹ میکرون و با شرایط عملیات آبدهی یکسان روکش گالوانیزه بر روی آن‌ها قرار گرفته است. با انجام آزمایشات بسیار زیاد منحنی S-N هر نمونه بصورت تجربی بدست آمده است. با استفاده از نتایج بدست آمده ضرایب ثابت خستگی آماری برای قطعات بدست آمده است. با استفاده از دو روش میان یابی لاگرانژی و نویل، ضریب K بر حسب ضخامت روکش گالوانیزه بدست آمده است و در نهایت به ارائه رابطه‌ای پرداخته شده که با دانستن ضخامت روکش گالوانیزه در هر تنش دلخواه می‌توان تعداد سیکل‌های لازم تا شکست را تحت پدیده خستگی بدست آورد. نتایج بدست آمده تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند و برای نشان دادن میزان دقت روش نتایج حاصل از دو روش مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

کلیدواژگان

خستگی، ضخامت روکش، منحنی S-N، گالوانیزاسیون گرم.

Formulate Number Cycle of Fracture by the Thickness of the Warm Galvanizing Coating on the Fatigue

Kazem Reza Kashyzadeh^{1*}, Alireza Arghavan²

1- PhD Candidate, Young Researchers and Elite Club, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

* kazem.kashyzadeh@gmail.com

Abstract

The purpose of this article is to predict the number cycle of fracture on the different thicknesses of the warm galvanizing coating on plated parts using the micron scale. For this study, the abovementioned coating with the thickness of 13 & 19 were coated on standard specimens who were made of CK45 steel under the same conditions. Then, the S-N curve of each sample was attained empirically according to the standard fatigue testing. Using these results, the constant coefficient of statistical fatigue on the parts was calculated. The k ratio was also calculated according to the thickness of warm galvanizing coating using the two methods of Lagrange and Neville Interpolation and finally we offered an equation by which we can estimate the required cycles of fracture by knowing the thickness of coating with each specified stress under fatigue phenomenon. The calculated results significantly corresponded to experimental results. To ensure the accuracy of the research, the results of the two methods were compared with one another.

Keywords

Fatigue, Thickness of coating, S-N diagram, Warm Galvanizing

کار پدید می‌آید، گواهی بر این مدعا است که خستگی مسئله‌ای جدی است. تحلیل شکست اغلب نقاط ضعف سازه را که باعث مقاومت کم در برابر خستگی می‌شود را آشکار می‌سازد. اگر چه رفتار خستگی مواد بسیار زیاد مورد بررسی قرار گرفته است اما هنوز این تحقیقات برای ارزیابی عمر خستگی در تمام شرایط کافی نیست و به بررسی بیشتر فرآیندها و عوامل موثر در آن‌ها نیازمند است. [۱ و ۲] به دلیل هزینه بالا و زمان زیاد مورد نیاز برای انجام تست خستگی و تعداد نمونه‌های آزمایش فراوان لازم است تا خاصیت آماری خستگی مورد توجه قرار بگیرد. در این تحقیق از استاندارد تست خستگی که توسط ASME در سال ۲۰۰۳ ارائه شده برای تعیین یک منحنی S-N با حداقل تعداد نمونه-های آزمایشگاهی استفاده شده است. [۳]

۱- مقدمه

شکست خستگی در سازه‌های فلزی پدیده‌ای شناخته شده است. در قرن نوزدهم میلادی پژوهش‌هایی توسط آگوست وولر انجام شد. وی متوجه شد که باری که بسیار کوچک‌تر از استحکام ایستایی سازه است، اثری تخریبی بر آن ندارد. اما اگر همین بار به دفعات و تکرار بر سازه وارد شود آن را به شکست بدون هیچ اختلال قبلی و نشانه ظاهری می‌کشاند.

تاریخ سازه‌های مهندسی شاهد شکست‌های متعددی در ماشین آلات، خودروه‌ها، سازه‌های جوشی، هواپیما و غیره بوده است. این شکست‌ها حوادث مصیبت بار زیادی را به بار آورده‌اند و همچنین آثار اقتصادی ناشی از شکست خستگی بسیار مهیب است.

در طی پژوهش و آزمایشات عملی جامع، دانش زیادی در مورد خستگی در سازه‌ها و روند خستگی حاصل شده است. شکست خستگی که در حین

۲- تحلیل روکش گالوانیزه گرم

گالوانیزاسیون غوطه‌وری گرم فرآیندی است که در آن در اثر غوطه‌ور نمودن قطعات فولادی یا چدنی در حمام مذاب روی، پوشش چسبیده و محافظ روی و ترکیبات روی و آهن در سطح آن‌ها تشکیل می‌شود. لایه‌های نزدیک به فلز پایه، ترکیبات آهن-روی است که توسط لایه بیرونی «روی» پوشیده شده‌اند. می‌توان ترتیب این لایه‌ها را در شکل ۱ مشاهده نمود [۵]:

(۱) لایه اتا: zinc ۱۰۰٪

(۲) لایه دلتا: zinc + 6% iron ۹۴٪

(۳) لایه دلتا: zinc + 10% iron ۹۰٪

(۴) لایه گاما: zinc + 25% iron ۷۵٪

(۵) فلز پایه



شکل ۳ دستگاه تست کشش STM-600

در ادامه نیز قطعات نهایی آماده شده برای تست کشش را می‌توان در شکل ۴ مشاهده نمود.



شکل ۴ قطعات نهایی آماده شده برای تست کشش

۳-۳- نتایج تست کشش

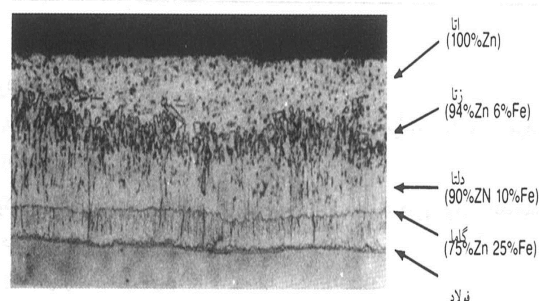
۳-۳-۱- تست کشش قطعه بدون روکش

در جدول ۱ نتایج کلی حاصل از آزمایش کشش محوری قطعه بدون روکش آورده شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی قطعه بدون روکش

Result	Peak	Break	Yield
Force (N)	109983.8	94210.41	109659.1
Extension(mm)	0.988269	4.286479	0.525976
Stress (MPa)	972.4698	833.0029	969.5992
Elongation	1.976538	8.572957	1.051952
El. After Break	1.73406	8.360717	0.8100967
Module (MPa)	49200.67	9716.634	92171.43
Energy (J)	108 k	453.2 k	57.2 k

به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار قطعه، نمودار تنش-کرنش آن نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



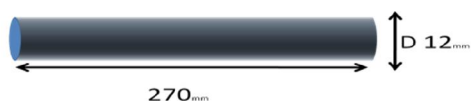
شکل ۱ ترتیب لایه‌های نزدیک به فلز پایه در آبکاری گالوانیزاسیون گرم [۵]

با توجه به ترکیبات لایه‌های مختلف بیان شده در بالا، به وضوح مشخص است که لایه گاما دارای بیشترین مقدار آهن است که نشان‌دهنده ترد بودن این لایه (گاما) می‌باشد. بنابراین با افزایش ضخامت روکش گالوانیزه، ضخامت لایه گاما نیز افزایش یافته و امکان شکست این لایه را بیشتر از قبل می‌کند. لذا با افزایش ضخامت روکش گالوانیزه، آن را تردتر از قبل نموده و به نوبه خود منجر به کاهش قابل توجهی در حد تحمل خستگی روکش می‌گردد [۶-۷].

۳- بدست آوردن خواص مکانیکی قطعات

۳-۱- آماده‌سازی قطعات

قطعات از جنس فولاد *Ck45* مطابق با استانداردهای آزمون تست کشش به دقت (مطابق با شکل ۲) ماشینکاری شده است و سپس عملیات پرداخت سطحی بر روی آن‌ها انجام گرفته است. در آخرین مرحله از آماده‌سازی قطعات، با استفاده از فرآیند آبکاری روکش گالوانیزه را با ضخامت‌های ۱۳ و ۱۹ میکرون با شرایط عملیات آبدهی یکسان از جمله دما، رطوبت و دیگر عوامل تأثیرگذار قطعات آبکاری شده‌اند. [۸]



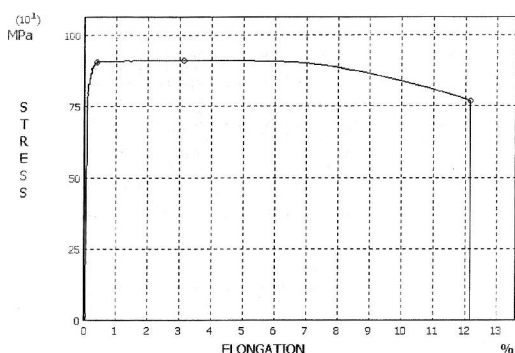
شکل ۲ هندسه نمونه آزمایشگاهی برای تست کشش

۳-۳-۲- تست کشش قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۹ میکرون

برای قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۹ میکرون نیز تست کشش انجام شده است و نتایج به دو صورت پارامتری در جدول و نیز نمودار تنش- کرنش استخراج شده است.

جدول ۳ خواص مکانیکی قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۹ میکرون

Result	Peak	Break	Yield
Force (N)	107045.3	95098.09	106539.9
Extension(mm)	3.583356	6.912126	1.832357
Stress (MPa)	946.4883	840.8517	942.0194
Elongation	7.166711	13.82425	3.664713
El.After Break	7.465292	13.8729	3.952722
Module (MPa)	13206.73	6082.439	25705.13
Energy (J)	373.3 k	719.5 k	186.1 k



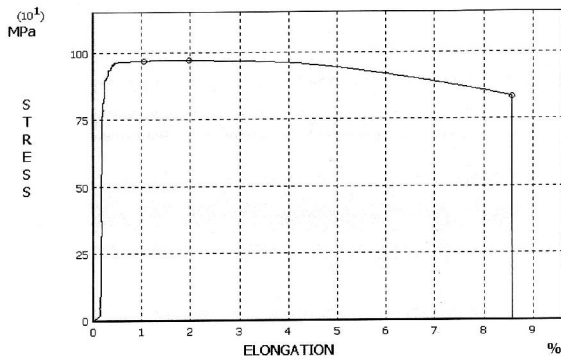
شکل ۷ نمودار نیرو بر حسب درصد افزایش طول قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۹ میکرون

۴- تست خستگی

بر اساس استاندارد تعداد قطعات آزمایشگاهی لازم برای بدست آوردن قسمت اول منحنی S-N (عمر محدود) برابر ۸ نمونه آزمایشگاهی است. در این تحقیق قطعات در ۴ سطح تراز بار اعمالی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، بدین صورت که در هر تراز ۲ نمونه آزمایش شده است و میانگین تعداد سیکل‌های شکست بدست آمده در هر سطح به عنوان سیکل شکست آن سطح تراز بار اعمالی در نظر گرفته شده است [۹-۱۰].

۴-۱- آماده سازی قطعات

هر یک از گروه ضخامت‌های مورد بررسی روکش گالوانیزه، از جنس فولاد CK45 مطابق با استاندارد انگلیسی BS3518(1962) تهیه شده است. نمونه‌های آزمایش به دقت و بر اساس شکل و اندازه بیان شده در استاندارد (شکل ۸) ماشینکاری شده و سپس عملیات پرداخت سطحی بر روی آن‌ها انجام گرفته است. به طوری که زبری سطح به حداقل میزان ممکن خود برسد و سطح آن کاملاً صاف و صیقلی گردد.



شکل ۵ نمودار نیرو بر حسب درصد افزایش طول قطعه بدون روکش

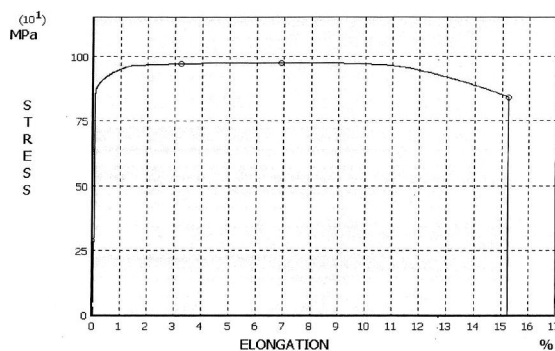
۳-۳-۲- تست کشش قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۳ میکرون

در جدول ۲ نتایج استخراج شده از آزمایش کشش محوری قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۳ میکرون آورده شده است.

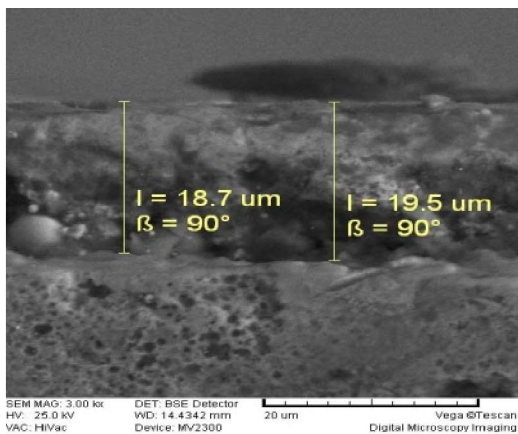
جدول ۲ خواص مکانیکی قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۳ میکرون

Result	Peak	Break	Yield
Force (N)	105392.9	87833.47	105193.9
Extension(mm)	1.810215	5.641043	1.478078
Stress (MPa)	931.8779	776.6183	930.1183
Elongation	3.62043	11.28209	2.956157
El. After Break	3.457021	11.10079	2.792546
Module (MPa)	25739.43	6883.641	31463.77
Energy (J)	178.4 k	560.6 k	143.5 k

برای بررسی‌های بیشتر، نمودار تنش-کرنش قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۳ میکرون در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶ نمودار نیرو بر حسب درصد افزایش طول قطعه با روکش گالوانیزه و ضخامت ۱۳ میکرون



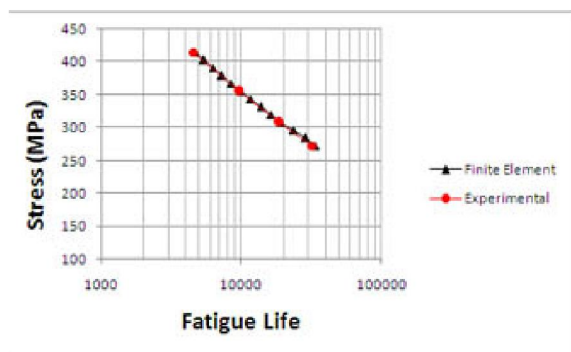
شکل ۱۱ تصویر برداری از سطح آبکاری قطعه آزمایشگاهی تست خستگی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی SEM [۱۱]

۲-۴- نتایج تست خستگی

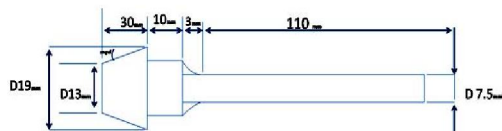
آزمایشات در ۴ سطح تراز بار اعمالی مختلف مطابق جدول ۴ انجام شده و میانگین نتایج تجربی بدست آمده در هر سطح را به عنوان سیکل شکست در آن سطح معرفی کرده و بر اساس آن نمودار S-N مربوط به هر کدام از ضخامت‌های روکش گالوانیزه بدست آمده است [۱۲-۱۵].

جدول ۴ بارهای اعمالی در تست خستگی

سطح تراز	بار اعمالی بر حسب نیوتن
۱	۱۰۸/۹
۲	۱۱۷/۷
۳	۱۲۲/۶
۴	۱۲۴/۶



شکل ۱۲ منحنی تنش-عمر برای قطعه بدون روکش



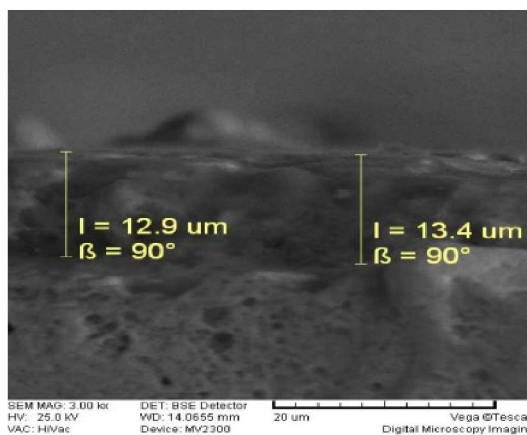
شکل ۸ هندسه نمونه آزمایشگاهی برای تست خستگی چرخان مور

در آخرین مرحله با استفاده از فرآیند آبکاری مطابق آنچه در شکل ۹ نشان داده شده، روکش گالوانیزه را با ضخامت‌های ۱۳ و ۱۹ میکرون با شرایط عملیات آبدهی یکسان از جمله دما، رطوبت و دیگر عوامل تأثیر گذار مانند مدت غوطه‌وری در حمام، میزان ولتاژ جریان و قطعات آبکاری شده-اند.



شکل ۹ قطعات پس از فرآیند آبکاری و آماده برای تست خستگی

با استفاده از دستگاه تصویر بردار میکروسکوپ الکترونی (SEM) از قطعات روکش شده با ضخامت‌های مختلف مطابق شکل ۱۰ و شکل ۱۱ چندین عکس با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر تهیه شده است تا بتوان ضخامت روکش آبکاری شده بر روی قطعات را اندازه‌گیری نمود:



شکل ۱۰ تصویر برداری از سطح آبکاری قطعه آزمایشگاهی تست خستگی با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی SEM [۱۱]

جدول ۵ ضرایب اولیه k بر اساس نتایج تست خستگی

ضخامت روکش	ضریب k
0	2.5130
13	2.3795
19	2.32078

به منظور فرموله کردن ضریب بر حسب ضخامت روکش از دو روش لاگرانژی و نویل بطور جداگانه استفاده شده است.

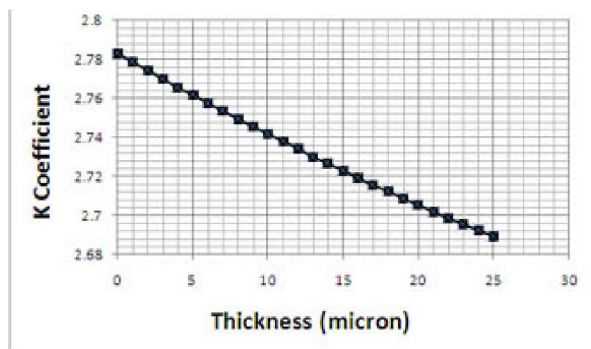
۵-۲-۱- روش لاگرانژی برای محاسبه ضریب k

با استفاده از روابط زیر ضریب k بر حسب ضخامت روکش t بدست آمده و روند تغییرات ضریب در شکل ۱۵ آورده شده است:

$$F(x) \equiv \prod_{i=1}^n (x - x_i) \quad (2)$$

$$L_j(x) = C_j \frac{F(x)}{(x - x_j)} \quad (3)$$

$$K(t) = 12.112e^{-5}t^2 - 0.0107t + 2.5130 \quad (4)$$



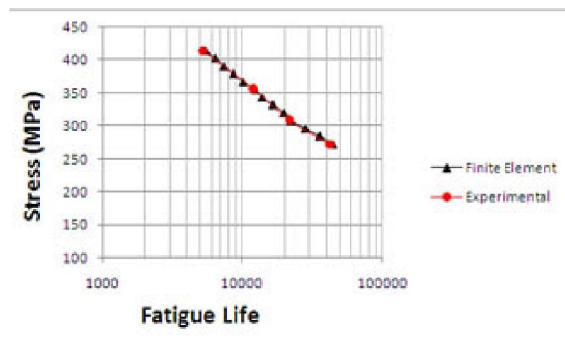
شکل ۱۵ تغییرات ضریب k بر حسب ضخامت روکش t بر اساس روش لاگرانژی

۵-۲-۲- روش نویل برای محاسبه ضریب k

با استفاده از رابطه زیر ضریب k بر حسب ضخامت روکش t بدست آمده و روند تغییرات آن در شکل ۱۶ آورده شده است:

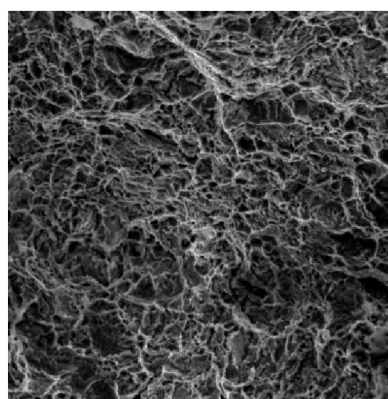
$$P(x) = \frac{(x-x_j)P_{0,1,\dots,j-1,j+1,\dots,k}(x) - (x-x_i)P_{0,1,\dots,i-1,i+1,\dots,k}(x)}{x_i - x_j} \quad (5)$$

$$K(t) = 12e^{-5}t^2 - 0.0089t + 2.5130 \quad (6)$$



شکل ۱۳ منحنی تنش-عمر برای قطعه با روکش گالوانیزه با ضخامت ۱۳ میکرون

با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) از سطح شکست قطعات مطابق شکل ۱۴ چندین عکس با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر تهیه شده است:



شکل ۱۴ تصویر برداری از سطح شکست قطعه آزمایشگاهی تست خستگی با دستگاه SEM

۵- بدست آوردن ضرایب ثابت خستگی آماری

۵-۱- ضریب ثابت مربوط به روکش بدون اثر پذیری از ضخامت آن

در این مقاله برای ساده سازی روابط ریاضی موجود و حل آن‌ها فرض شده است که فلز پایه به همراه روکش با ضخامت میکرونی، یک ماده همگن جدید را تشکیل می‌دهند. بر این اساس ثابت نخست خستگی آماری b نامیده شده است، بطوریکه:

b_1 : ثابت نخست خستگی آماری برای قطعه بدون روکش

b_2 : ثابت نخست خستگی آماری برای قطعه روکش شده

$$b_1 = -0.216633$$

$$b_2 = -0.203175$$

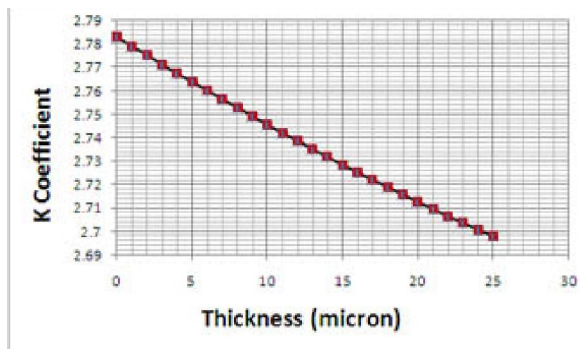
ضریب ثابت bb بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$bb = \frac{1}{b_1} \quad , \quad bb = \frac{1}{b_2} \quad (1)$$

۵-۲- ضریب ثابت مربوط به روکش بر حسب ضخامت آن

بر اساس نتایج بدست آمده از تست خستگی، ضریب k بر حسب ضخامت روکش t مطابق با جدول ۵ در نظر گرفته شده است.

- [7] K. R. Kashyzadeh, M. Rajabpour, "Prediction damage in galvanized coating with microns thickness", 1Th National Mechanical Engineering Conference, Marvdasht-Shiraz, Iran, 2011, (in Persian)
- [8] B. Khorshidi, "Strength of Material Lab", University book publication, 1383, (in Persian)
- [9] Y. L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, M. Sarkey, "Fatigue Testing and Analysis", 2005 Handbook
- [10] A. Timoshenko, "Advanced Strength of material", Ayizh publication, 1380, (in Persian)
- [11] A. Arghavan, K. R. Kashyzadeh, A. Amiri Asfarjani, "Investigating Effect of Industrial Coatings on Fatigue Damage", Journal of Applied Mechanics and Materials, Vol. 87, P230, Applied Mechanics and Manufacturing Technology, 2011-09-11
- [12] H. Jahed motlagh, "Ansys", Indusrtly & Science University, 1379, (in Persian)
- [13] A. Hancq, "Fatigue analysis using Ansys", Ansys Inc
- [14] R. Browell, A. Hancq, "Calculating and displaying fatigue results", 2006.
- [15] K. R. Kashyzadeh, A. Arghavan, "Study of the effect of different industrial coating with micro-scale thickness on the CK45 steel by experimental and finite element methods", Strength of Materials, Vol. 45, No. 6, 2013



شکل ۱۶ تغییرات ضریب k بر حسب ضخامت روکش t بر اساس روش نویل

۶- محاسبه تعداد سیکل شکست

تأثیر ضریب ثابت k بر حسب ضخامت روکش t در حد میکرون، در تعریف ضریب kk بصورت زیر اعمال شده است:

$$kk = \frac{1000 \times K(t)}{bb} \quad (7)$$

در این مرحله با در نظر گرفتن ضرایب تعریف شده در این مقاله، رابطه زیر ارائه شده که با دانستن ضخامت روکش در هر تنش دلخواه می‌توان تعداد سیکل لازم تا شکست را بدست آورد.

$$N = S^{bb} + e^{kk} \quad (8)$$

۷- نتیجه‌گیری

با استفاده از فرمول ارائه شده به راحتی می‌توان تعداد سیکل شکست در قطعات آبکاری شده با روکش گالوانیزه با ضخامت‌های نازک ابعادی در حد میکرون را بدون نیاز به استفاده از نرم افزارهای المان محدود و شبیه‌سازی و تحلیل بدست آورد. حتی نیاز به هزینه‌های زیاد برای تهیه نمونه آزمایشگاهی و انجام تست و نیز صرف وقت زیاد می‌توان نتایج را با درصد قابل قبولی از خطا در مقایسه با سرعت و راحتی مراحل، بدست آورد. از دیگر مزایای این روش می‌توان تعداد سیکل شکست قطعات را بصورت پارامتری بر حسب ضخامت آن نیز در معادلات بنیانی برای بهینه‌سازی ضخامت روکش استفاده نمود.

۸- مراجع

- [1] M. J. Ostad-Ahmad-Ghorabi, "Metal Fatigue notebook", Department of Mechanical Engineering, Islamic azad university, Semnan- branch, Iran, 2011, (in Persian)
- [2] R. I. Stefener, H. A. Fachs, "Metal Fatigue in Engineering", Gilan university publication, 1378, (in Persian)
- [3] J. F. Luo, Y. J. Liu, E. J. Berger, "Interfacial Stress analysis for multi-coating systems using an advanced boundary element method", 1999
- [4] C. Giummarra, H. R. Zonker, "Improving the Fatigue Response of Aerospace Structural Joints", 2005, Germany
- [5] A. Besharat, "Metals Coating Engineering", Trah publication, 1384, (in Persian)
- [6] K. R. Kashyzadeh, A. Arghavan, A. A. Asfarjani, "investigating effect of galvanizing coating on the Fatigue Endurance Limit of Specimens", 3Th National Mechanical Engineering Conference, Khomeini Shahr-Isfahan, IRAN, 2010, (in Persian)