



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΜΕ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΚΟΛΛΕΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτρης Ε. Κολυφότης

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

ΕΜΚ ΔΕ 2018/30

Κολυφέτης Δ. Ε. (2018).
Διερεύνηση συνδέσεων με εποξειδικές κόλλες σε μεταλλικές κατασκευές με
πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2018/30
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kolyfetis D. E. (2018).
Investigation of adhesive bonding in steel construction with experimental and
numerical methods
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2018/30
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	5
Extended Abstract.....	7
Ευχαριστίες.....	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
1.1. Γενικά.....	16
1.2. Σύγχρονη θεώρηση της χρήσης συγκολλητικών ουσιών στα έργα Πολιτικού Μηχανικού.....	17
1.3. Συγκόλληση με χρήση συγκολλητικών ουσιών.....	19
1.4. Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	20
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	21
2.1. Γενικά στοιχεία για τα πολυμερή.....	21
2.1.1. Κατάταξη πολυμερών.....	21
2.1.2. Μεταπτώσεις Πολυμερών.....	23
2.1.3. Μηχανικές Ιδιότητες Πολυμερών.....	23
2.1.4. Μηχανική αστοχία Πολυμερών.....	24
2.2. Γενικά στοιχεία για τις κόλλες.....	27
2.2.1. Ορισμός.....	27
2.2.2. Κατηγοριοποίηση.....	27
2.2.3. Δομή των συγκολλητικών ουσιών.....	28
2.2.4. Μηχανικές ιδιότητες συγκολλητικών στρωμάτων.....	30
2.2.5. Ιδιότητες των συγκολλήσεων με χρήση κόλλας.....	38
2.2.6. Συμπεριφορά των συγκολλητικών ουσιών σε θραύση.....	42
2.2.7. Αντοχές των συγκολλήσεων σε μεταλλικές κατασκευές.....	43
2.2.8. Τάσεις στις μεταλλικές συγκολλήσεις με λεπτό, παραμορφώσιμο κολλητικό στρώμα.....	46
2.2.9. Γενικά συμπεράσματα.....	50
2.3. Αρχή της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας.....	50
2.3.1. Κατασκευή καμπύλων αναφοράς.....	52
2.4. Λειτουργία Θερμοστάτη.....	53
2.4.1. Γενικά στοιχεία.....	53
2.4.2. Αρχή λειτουργίας θερμοστάτη.....	53
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	56
3.1. Γενικός στόχος πειραμάτων.....	56

3.2.	Περιγραφή πειραματικής συσκευής.....	56
3.3.	Διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων.....	63
3.3.1	Προετοιμασία δοκιμίων.....	63
3.3.2	Διαδικασία συγκόλλησης.....	65
3.3.3	Τελική διαμόρφωση πειραματικής διάταξης.....	67
3.3.4	Δοκιμές εφελκυσμού.....	71
3.3.5	Επεξεργασία των αποτελεσμάτων.....	72
3.3.6	Κατασκευή ισόθερων καμπυλών.....	75
4.	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	80
4.1	Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.....	80
4.4.1	Προσομοίωση ιδιοτήτων υλικών.....	80
4.4.2	Αριθμητικό μοντέλο.....	81
4.4.3	Τελικά αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης.....	84
5.	ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	89
5.1.	Καμπύλη αναφοράς.....	89
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΥΝΑ.....	93
6.1.	Συμπεράσματα.....	93
6.2.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	94
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95

Διερεύνηση συνδέσεων με εποξειδικές κόλλες σε μεταλλικές κατασκευές με πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους

Κολυφέτης Δ. Ε. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλλει στην εδραίωση της κόλλας ως τρόπου συγκόλλησης στις μεταλλικές κατασκευές.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η καταλληλότητα μιας κόλλας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή θα πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τη συμπεριφορά της σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό απαιτείται κατ' αρχήν η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς της κόλλας, προκειμένου βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων να κατασκευαστεί η καμπύλη αναφοράς της, η οποία μας επιτρέπει να γνωρίζουμε πώς θα συμπεριφερθεί η συγκόλληση σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η αντοχή μιας συγκεκριμένης κόλλας, μέσω δοκιμών εφελκυσμού σε διάφορες θερμοκρασίες και κατασκευάστηκε η καμπύλη αναφοράς της (καμπύλη τάσης-ταχύτητας εφελκυσμού), η οποία επαληθεύτηκε και αριθμητικά με εφαρμογή προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

Συγκεκριμένα, συναρμολογήθηκε πειραματική διάταξη, αποτελούμενη από δύο κύριες συσκευές, ένα θερμοστάτη και μια συσκευή εφελκυσμού, στην οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε χαλύβδινα δοκίμια, που συγκολλήθηκαν με την υπό μελέτη κόλλα, σε οκτώ (8) διαφορετικές θερμοκρασίες (-20°C, 0°C, 10°C, 23°C, 40°C, 50°C, 60°C και 80°C) και σε τρεις (3) διαφορετικές ταχύτητες εφελκυσμού (0.1mm/min, 1mm/min και 10mm/min) για κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων (οκτώ (8) σειρές των εννέα (9) πειραμάτων) χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό της καμπύλης αναφοράς της κόλλας, βάσει των ισόθερων καμπύλων τάσης – ταχύτητας εφελκυσμού, οι οποίες λήφθηκαν για κάθε μία από τις οκτώ (8) θερμοκρασίες.

Για την αριθμητική επαλήθευση της καμπύλης αναφοράς τα πειραματικά αποτελέσματα εισήχθησαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, από την εφαρμογή του οποίου επιβεβαιώθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα και διαμορφώθηκαν και αριθμητικά οι ισόθερμες καμπύλες τάσης – ταχύτητας εφελκυσμού.

Τέλος, στηριζόμενοι στην αρχή της υπέρθεσης χρόνου – θερμοκρασίας και βάσει της θεωρίας των Williams – Landel - Ferry υπολογίσαμε το συντελεστή

μετατόπισης α_T της εκάστοτε ισόθερμης καμπύλης, επιλέγοντας ως θερμοκρασία αναφοράς τους 23°C . Η θερμοκρασία αναφοράς είναι η θερμοκρασία της οποίας η ισόθερμη καμπύλη τάσης - ταχύτητας φόρτισης θα διατηρηθεί σταθερή πάνω στο λαγαριθμικό άξονα των ταχυτήτων, ενώ οι υπόλοιπες θα μετακινηθούν αναλόγως δεξιά ή αριστερά, σύμφωνα με το συντελεστή μετατόπισης α_T δημιουργώντας με αυτό το τρόπο την καμπύλη αναφοράς.

Investigation of adhesive bonding in steel construction with experimental and numerical methods

Kolyfetis D. E. (supervised by Vayas I.)

Extended Abstract

1. Introduction

In recent years, several efforts have been made in the field of metal structures to replace structural bolting assemblies and conventional welding with specific adhesives, which under the stringent production conditions can result to extremely effective joint bonding. In the case of steel structures, the ability and the application procedure of adhesives should be introduced into the relevant Eurocode, so the viability and safety of structures can be ensured.

In order to assess the suitability of an adhesive for a particular application, available data must exist as evidence of its behavior under real load and temperature conditions.

To this purpose is required, as a first step in the procedure, the experimental investigation of the adhesive's behavior. The results will make possible to produce the master curve of the tested adhesive indicating the relationship between force and speed rate applied. This will allow us to know how the adhesive/bonded joints will behave under specific loading and temperature conditions.

In this diploma thesis, the strength of a particular adhesive was studied through tensile tests at various temperatures and the master curve was produced. This was also numerically verified by applying the ABAQUS finite element program.

2. Theoretical background

The principle of time-temperature superposition

The principle of time-temperature superposition is a concept in the physics of polymers and in the physics of liquids that are vitrified. The superposition principle is used to determine temperature-dependent mechanical properties of viscoelastic materials, such as adhesives, of known properties at a reference temperature. It has been observed that the curves of instantaneous measurements of mechanical properties over time do not change form with the change of temperature. They only shift left or right. This means that an isothermal curve at a given temperature can be used as a reference for predicting corresponding curves at various temperatures by applying a

displacement. The principle of time-temperature superposition of viscoelasticity is based on the above observation.

Applying the superposition principle usually involves the following steps:

- Experimental determination of the curves of isothermal viscoelastic mechanical properties that depend on the charge frequency at different temperatures and for a small frequency range.
- Calculate a shift factor a_T for correlating these properties with the temperature and frequency range
- Experimental determination of the master curve showing the effect of the charge frequency for a wide range of frequencies.
- Applying the displacement coefficient to determine the temperature-dependent properties across the frequency range of the master curve.

In the present study the properties of the adhesive tested were studied for a range of tensile strength v speed rather than for a range of frequencies, without affecting the applicability of the principle of time - temperature superposition.

Since in practice both the number of measurements in the laboratory and time required are limited, by applying the principle of time-temperature superposition the number of required tests can be reduced. In the present study, characteristic tensile strength values were measured experimentally for a range of temperatures and loading speeds. The values were differentiated according to the displacement coefficient a_T on the logarithmic speed axis producing the master curve. The displacement factor is calculated from the Williams-Landel-Ferry relationship:

$$-\log(a_T) = \frac{c_1(T-T_{ref})}{c_2+(T-T_{ref})}$$

In the above function, the coefficients C_1 and C_2 which depend on the reference temperature T_{ref} , are shown. The reference temperature is the temperature at which the isothermal tensile strength - loading speed curve will remain constant while the rest will differentiate accordingly, to either the right or the left.

For coefficient a_T :

$$T > T_{ref} \rightarrow a_T < 1$$

$$T < T_{ref} \rightarrow a_T > 1$$

$$T = T_{ref} \rightarrow a_T = 1$$

The determination of C_1 and C_2 coefficient is particularly demanding, as special experiments and procedures are required. For the particular adhesive studied, the corresponding experiments were performed with suggested values as a result. These values were then verified at a later stage, by applying the graphical method of isothermal curves displacement for two extreme temperatures (-20°C and 80°C).

3. Experimental investigation

The experimental part of the present study was conducted at the Department of Steel and Timber Structure, Brandenburg University of Technology at Cottbus, Germany.

In carrying out the experiments, it was deemed necessary to assemble an experimental apparatus consisting of two main devices, a thermostat for circulating heating oil and a testbed where tensile strength measurements could be performed (Figure 3.1).

Tensile tests were carried out on steel joints bonded with the adhesive under study at eight different temperatures (-20°C, 0°C, 10°C, 23°C, 40°C, 50°C, 60°C and 80°C) and at three different speeds (0.1mm/min, 1mm/min and 10mm/min) for each temperature. At each particular speed, three (3) repetitive tensile tests were performed for more reliable results. The experimental results (eight (8) series of nine (9) experiments each) were used to produce eight (8) isothermal tensile strength v speed curves - one for each temperature. These were ultimately used to produce the adhesive's master curve.

Steel joints of grade S355, diameter $d = 25\text{mm}$ and length $L = 110\text{mm}$ were used for the tensile tests, bonded with the adhesive under study. This particular adhesive is a product of the British company LORD, namely the LORD 410 acrylic adhesive used in combination with the Lord 19 or 19GB accelerator, with the properties shown in Figure 3.11.

Suitable joint preparation is necessary before the start of the tests, in order to allow constant temperature over the entire length of the joints, especially at the adhesive bonded surfaces. To this purpose, a hole with a diameter equal to the diameter of the heating oil circulation pipe was opened, near the area where the two steel joints were bonded. A smaller hole was opened at a lower point, in order to place the thermometer.

The bonded surfaces were smoothed out with a special grinding wheel. They were then immersed in acetone, so they could be cleaned of any dust or other particles in order to obtain proper and homogeneous bonding. Finally, the samples were dried out with compressed air.

A special pistol was used for the bonding with mixers used for the proper mixing levels of the adhesive and the accelerator.

The placement of the adhesive started around the bonded surface and advances towards the center until the entire surface is covered. A thickness of 1mm adhesive layer was chosen which is the typical thickness for metal constructions. The adhesive is left for three (3) days in order to gain its ultimate strength.

After three (3) days the test piece was placed on the testbed. For the proper placement of each specimen, special handles have been fitted to the top and bottom in order to prevent the introduction of torque in the system overall. The specimen is adjusted to the testbed with a special woolen material as cover (Figures 3.27-3.30) for better thermal insulation. Finally, the testbed is connected to a laptop computer recording displacement readings, tensile strength, speed, steel joints thermometer temperature and room temperature.

The main part of the experiment involves opening the thermostat and regulating the temperature of the heating oil inside the thermostat container. It is obvious that the temperature inside the thermostat container is different from the temperature that finally

acquires the specimen. There must be continuous control of the temperature inside the thermostat and close monitoring of the specimen thermometer readings in order to ensure the desired temperature throughout the experiment. The testbed was then activated for a particular speed at a time until fracture.

The speeds selected were 0.1 mm/min, 1 mm/min and 10 mm/min. Specifically, the 1mm / min speed is provided by the standard DIN EN 15870. After the test ends, the specimens are cleaned again with the grinding wheel and the same procedure is followed for the next series of experiments.

After the completion of the experiments, the measurements are processed in order to produce the isothermal tensile strength – speed curve. They include the following parameters: Displacement (d), Strength (F), Specimen temperature at bondline (T) and Room temperature (Ti). The results of the experiments are presented in Annex A.

In order to produce the isothermal curve for every temperature, it is necessary to know the maximum tensile strength from every experiment. This results by dividing the maximum force at the breaking point to the bonding surface (readings are recorded in a laptop). The above procedure was performed 72 times (for 8 different temperatures x 3 different speeds x 3 repetitive measurements at each speed). Thus resulting to the eight (8) isothermal tensile strength – speed curves, one for each temperature. These will be used to produce the final master curve. The isothermal curves for the selected temperatures are presented in Diagrams 3.5-3.12.

4. Numerical investigation of experimental results

The program used to numerically investigate the experimental results is the Abaqus FEA, created in 1978, version 6.14, published in 2014, with programming language “Python”. This is one of the most widespread finite element programs with wide application in experimental simulation, especially in non-linear systems behavior, such as the one studied in the context of this diploma thesis.

A linear elastic material with the properties of S355 steel was used to simulate steel (Figure 4.1). The simulation of the specimens was achieved using Solid Elements (Figure 4.2). Seventeen (17) Wire Elements were used to simulate the adhesive, as they are capable of more accurately simulating the nonlinear behavior of the adhesive.

A tensile force - displacement curve is resulting from each experiment. The coordinates of this curve were used as input data in the model in order to simulate the behavior of the adhesive. Fixings were placed at the bottom part of the specimen for an improved simulation of the experiment. In this way, the displacements were limited to all three directions, while the revolutions were left free to spin. This did not affect the final results, since the applied speeds did not generate any moment.

Finally, the simulation of speed was just so important as critical. Since this particular program has no fixed units of measurement, it was not possible to set a value, e.g. 1mm / min, towards the desired direction. To address this problem, the quotient of the overall displacement to the total duration of each experiment was introduced in the model as the speed. This resulted in a speed that gave out satisfactory values. The model values were found to be in good agreement with the experimental, with a maximum deviation of around 2%. The temperature was not set as a separate parameter in this

simulation, as it was basically taken into consideration in the nonlinear behavior of wire elements. The data fed into the program depend on the temperature set each particular time.

By running the model, for each particular temperature corresponds a tensile strength force – displacement diagram, resulting to the maximum force applied and subsequently converting it to stress. The same procedure is repeated, obtaining finally three (3) stress values for each temperature, as the average of three iterative readings at each speed (a total of nine (9) values). Using this average stress value, the isothermal tensile strength - speed curve for each temperature results. Charts 4.4-4.11 present in comparative terms, numerical and experimental isothermal curves.

5. Master curve format

The configuration of the master curve depends on the reference temperature. In the present study, the room temperature of 23°C has been selected as the reference temperature. Cumulatively, the isothermal curves obtained on the basis of the experimental results are presented in Figure 5.1. In order to produce the master curve, the graphical method of displacement of the isothermal curves for the two extreme temperatures (-20°C and 80°C) must be applied as a first step. Then the Williams-Landel-Ferry Relationship must be applied in order to determine the final position of the isotherms on the master curve. The displacement coefficients as derived from the above Relationship are presented in Table 5.2.

The procedure applied in order to produce the master curve is as follows: The speeds used in the experiments, i.e. 0.1 mm / min, 1 mm / min and 10 mm / min, are multiplied, for each temperature, with the corresponding displacement coefficient α_T .

For example, at a temperature of -20 ° C the displacement coefficient is $\alpha_T = 10^6$. Therefore, the speeds at this temperature are multiplied by this coefficient. By following the same procedure for the remaining set of temperatures, the values that are presented in Table 5.3. result. Table 5.4 presents the corresponding results from the implementation of the numerical model.

After calculating the displacement coefficient for each temperature and multiplying with the corresponding speed, the final positions of the points on the master curve result. An effort was made to achieve the smoothest possible curve. .Diagram 5.2 presents comparative results for both master curves, as they were derived from the experimental results and from the implementation of the numerical simulation model.

On the merits, the master curve makes a match of the effect of temperature with the effect of speed on the adhesive's behavior. That is, the behavior at low temperatures has a direct correspondence to the behavior at high speeds (high strength), while behavior at high temperatures is corresponding to the behavior at low speeds (low strength). Therefore, if the shape of the master curve of the adhesive under study is known, this enables the successful prediction of the behavior of the bonded section at the corresponding temperature and speed.

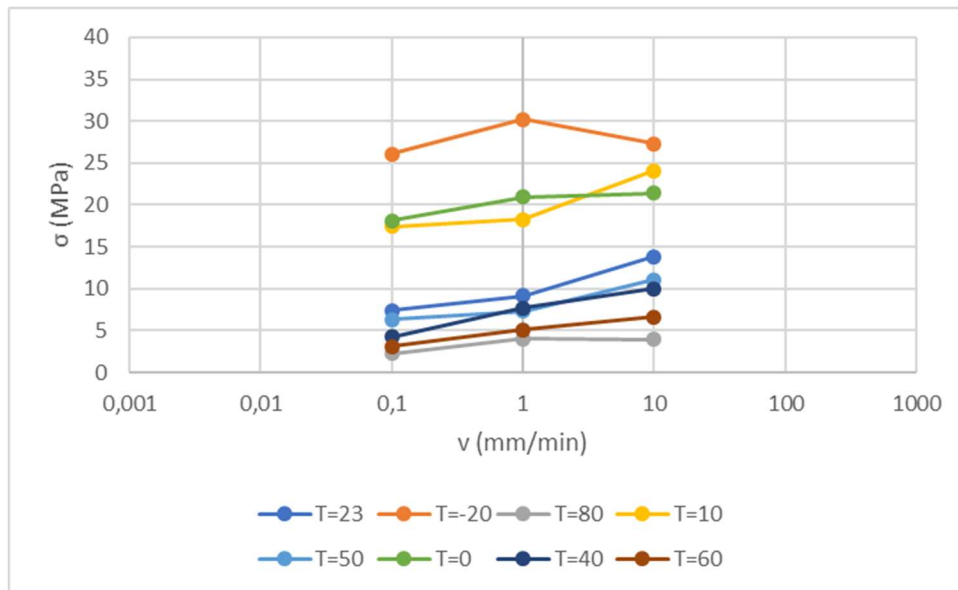


Diagram 5.1: Isothermal curves for the temperatures considered

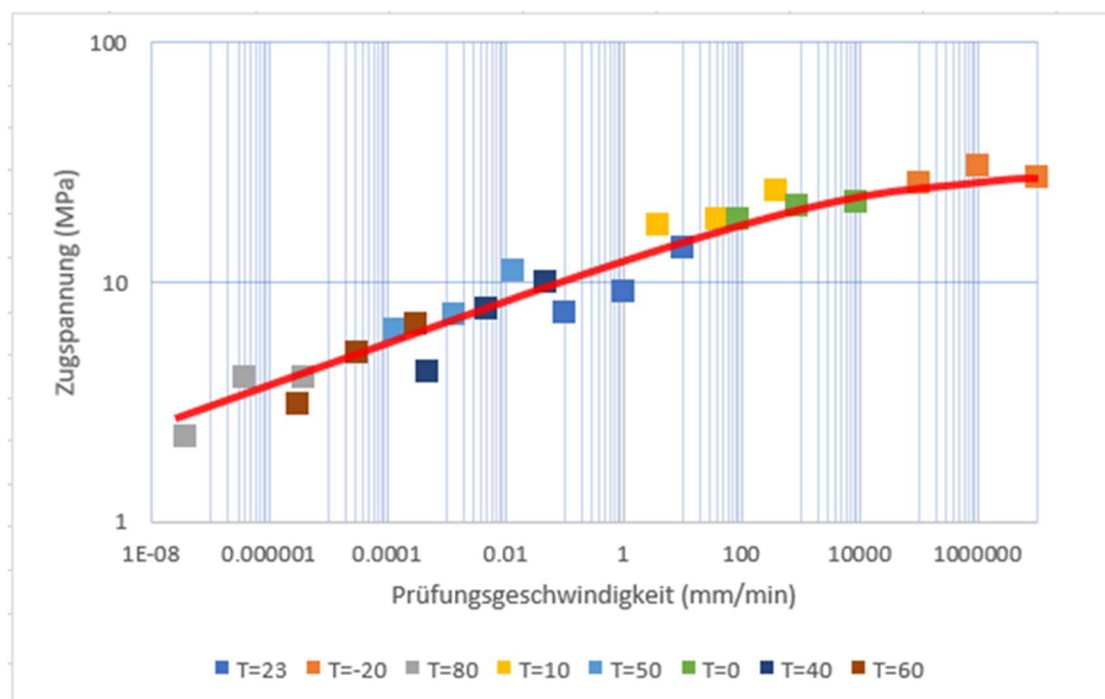


Diagram 5.2: Master Curve based on experimental results

6. Conclusions

The construction of the master curve of the adhesive under study, which was the objective of this diploma thesis, was successfully completed on the basis of the experimental results. These were found to be in very good correspondence with the values resulted from the application of a finite element model.

From the experimental results emerged that the increase in temperature leads “automatically” to a reduction in strength and elasticity of the adhesive, leading to a

ductile fracture. On the contrary, the temperature decrease increases the elasticity as well as the strength, with only one drawback, that of the brittle fracture. Regarding the effect of the loading speed at constant temperature, no safe conclusions can be drawn from the experimental results, as the increase in speed does not always lead to an increase in strength. On the contrary, from the master curve established, the expected adhesive performance is verified, i.e. increased strength when increasing the loading speed.

With regards to the numerical model and in particular to the selected simulation method with “Wire Elements” for the adhesive used and elements “Solid” for the steel used leads to very good results, as the experimental master curve is almost identical with the numerical.

Small deviations between the experimental results and the numerical model results are mainly due to the program's weakness to extract a significant number of force-displacement values and not to a programming error. Wire Elements are suitable for simulating non-linear behaviors. Large numbers do not seem to affect the end result and consequently greater addition of these elements does not necessarily give more accurate results.

7. Proposals for further research

This diploma thesis constitutes the basis for further research into the use of adhesives in civil engineering works. In order to establish the use of adhesive as a bonding method in metal constructions, it is deemed necessary to introduce calculation methods for the strength of every type of adhesive to the relevant Eurocodes.

To this purpose, it is necessary to study different types of adhesives in order to derive the respective master curves. These curves should be included in the characteristics of each adhesive so that the customer-end user is aware of its strengths and enables him to select the most suitable type for the particular application.

The next goal should be the construction of a finite element model that will not require experimental results as input data. Instead of experimental data it will only require changes in some of the adhesive's characteristics fit for simulation, such as elasticity, shear modulus or stiffness. Successful implementation will then allow prediction of the adhesive's behavior by means of immediate results at a lower cost.

A prerequisite for promoting the use of adhesives in metal constructions is the formulation and subsequent introduction into the Eurocodes of a relationship which enables the calculation of the adhesive's strength in the general form:

$$F_{K, Rd} = f(d, T, A)$$

where d is the thickness of the adhesive layer, T is the application temperature and A is the bonding surface.

Forming such a relationship is a laborious process and is not easy to conclude because, as it has already been mentioned, the strength of an adhesive depends on many factors and it is therefore necessary to introduce strict safety standards.

8. Acknowledgements

I would firstly like to express my grateful thanks and appreciation to my supervisor, Professor Ioannis Vagias, for his valuable help, support, patience and

sustained encouragement throughout the project, as well as for the opportunity to work at Brandenburg University of Technology in Cottbus, Germany completing successfully the experimental part of my diploma thesis.

I would also like to express my grateful thanks and appreciation to Mrs Yvonne Ciupack and Cottbus University Professor Hartmut Pasternak for their cooperation and guidance, especially for the time after the completion of the experiments, as well as the ever-willing staff of the University's lab.

Finally, I would like to thank Mrs Stella Avgerinou for her advice on the implementation of the numerical model successfully implemented in this work.

Ευχαριστίες

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Ιωάννη Βάγια για την πολύτιμη βοήθειά του και την ευκαιρία που μου προσέφερε να συνεργαστώ με το πανεπιστήμιο του Cottbus και να ολοκληρώσω εκεί το πειραματικό μέρος της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Yvonne Ciupack και τον καθηγητή του πανεπιστημίου του Cottbus κύριο Hartmut Pasternak για την συνεργασία και την καθοδήγησή τους, ακόμα και μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, καθώς επίσης και το πάντα πρόθυμο προσωπικό του εργαστηρίου του πανεπιστημίου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Στέλλα Αυγερινού για τις συμβουλές της σε θέματα εφαρμογής του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης που εφαρμόστηκε επιτυχώς στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες στο χώρο των μεταλλικών κατασκευών για την αντικατάσταση των κοχλιώσεων και των συμβατικών συγκολλήσεων από ειδικές κόλλες, οι οποίες κάτω από αυστηρές εργοστασιακές συνθήκες μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρές συνδέσεις. Οι συνδέσεις με τη χρήση συγκολλητικών ουσιών είναι ευρέως διαδεδομένες στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροναυπηγική, όπου και χρησιμοποιούνται επί δεκαετίες. Στα έργα όμως Πολιτικού Μηχανικού η χρήση τους είναι προς το παρόν αρκετά περιορισμένη, εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν υπάρχουν ακόμα επαρκή στοιχεία για τη σχέση φορτιού-παραμόρφωσης συγκολλητικών ουσιών σε μεταλλικές κατασκευές. Δεδομένου όμως ότι οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούνται από μεγάλο πλήθος προκατασκευασμένων στοιχείων, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά από τα δεδομένα που προέκυψαν από αντίστοιχες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροναυπηγική.

Στην περίπτωση όμως των μεταλλικών κατασκευών δεν αρκεί απλά και μόνο η πειραματική επαλήθευση των δεδομένων από τις προαναφερόμενες εφαρμογές. Η δυνατότητα και ο τρόπος εφαρμογής των συγκολλητικών ουσιών θα πρέπει να εισαχθεί στον αντίστοιχο Ευρωπαϊκό Κανονισμό, προκειμένου να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα και η ασφάλεια των κατασκευών. Για το σκοπό αυτό, θα πρέπει τα πειραματικά αποτελέσματα να επιβεβαιωθούν με αριθμητικές μεθόδους.

1.2. Σύγχρονη θεώρηση της χρήσης συγκολλητικών ουσιών στα έργα Πολιτικού Μηχανικού

Ο τρόπος σύνδεσης των μεμονωμένων στοιχείων ενός έργου και ειδικότερα μιας μεταλλικής κατασκευής επιδρά σημαντικά στη συνολική αντοχή της στο χρόνο. Για τη σύνδεση των μεμονωμένων στοιχείων, στην περίπτωση των μεταλλικών κατασκευών έχουν ευρεία εφαρμογή οι κοχλιάσεις και οι συγκολλήσεις. Η επιλογή του ορθότερου τρόπου σύνδεσης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τεχνικά (σημείο εφαρμογής, είδος φόρτισης) αλλά και αισθητικά κριτήρια. Για παράδειγμα, οι συγκολλήσεις προσθέτουν στην κατασκευή εσωτερικές τάσεις ή σε κάποιες περιπτώσεις προκαλούν ακόμα και αλλαγές στη δομή των υλικών, κάτι το οποίο, ειδικά στην περίπτωση των ελαφρών κατασκευών, επηρεάζει αρκετά τις αντοχές της ίδιας της μεταλλικής κατασκευής. Πέραν όμως των τεχνικών προβλημάτων, η παρουσία μιας συμβατικής συγκόλλησης προκαλεί και αισθητικά προβλήματα. Το γεγονός αυτό οδήγησε τους μηχανικούς στη διερεύνηση νέων τεχνικών συγκόλλησης, όπως η χρήση συγκολλητικών ουσιών.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η χρήση συγκολλητικών ουσιών είναι ευρέως διαδομένη στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροναυπηγική, καθώς μπορεί να μειώσει το βάρος του αεροσκάφους μέχρι και 15%. Ακόμα, στην αυτοκινητοβιομηχανία οι συγκολλητικές ουσίες παρουσιάζουν καλή αποσβεστική ικανότητα, υψηλή αντοχή σε κόπωση αλλά και μεγάλη παραμορφωσιμότητα, στοιχεία που συμβάλλουν στην ορθή οδική συμπεριφορά.

Παρά το γεγονός ότι η χρήση συγκολλητικών ουσιών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, αυτές δεν έχουν βρει ευρεία εφαρμογή στις μεταλλικές κατασκευές, καθώς υπάρχουν αμφιβολίες για την αντοχή τους, για την οποία δεν υπάρχουν προς το παρόν επαρκή στοιχεία. Η σχετική εμπειρία από τη χρήση των συγκολλητικών ουσιών στις ξύλινες κατασκευές δεν μπορεί να αξιοποιηθεί στην περίπτωση των μεταλλικών κατασκευών, λόγω των σημαντικών κατασκευαστικών και τεχνικών διαφορών τους.

Το γεγονός ότι οι κόλλες είναι διαφανείς τις καθιστά κατάλληλες για συγκολλήσεις σε προσόψεις από γυαλί και γενικά σε κατασκευές με κύριο κατασκευαστικό υλικό το γυαλί. Μια πρότυπη εφαρμογή αποτελεί η εκκλησία Herz-Jesu στο Μόναχο, η οποία είναι κατασκευασμένη εξ ολοκλήρου από γυαλί τοποθετημένο πάνω σε ένα πλαίσιο χάλυβα. Η μεταφορά του φορτίου γίνεται μέσω της πρόσωσης με τη βοήθεια πολυεπίπεδων στρώσεων από γυαλί. Η ένωση των στρώσεων αυτών με το πλαίσιο του χάλυβα γίνεται με μηκίδες μορφής U μέσω συγκόλλησης με κόλλα. Όλες οι συγκολλήσεις έγιναν στο εργοστάσιο για καλύτερο έλεγχο των αποτελεσμάτων, ενώ η τελική ένωση πραγματοποιήθηκε στο εργοτάξιο. Η συγκεκριμένη κατασκευή αποδεικνύει τα οπτικά και κατασκευαστικά πλεονεκτήματα της χρήσης συγκολλητικών ουσιών στις μεταλλικές κατασκευές



Εικόνα 1.1: Εκκλησία Herz-Jesu στο Μόναχο
Figure 1.1: Herz-Jesu Church in Munich



Εικόνα 1.2: Λεπτομέρεια Πρόσοψης
Figure 1.2: Façade detail



Εικόνα 1.3: Λεπτομέρεια Πρόσοψης
Figure 1.3: Façade detail



Εικόνα 1.4: Λεπτομέρεια στο εσωτερικό
Figure 1.4: Interior detail

Παρά το γεγονός ότι τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα από τη χρήση συγκολλητικών ουσιών είναι ενθαρρυντικά δεν έχει καταστεί δυνατή η ευρεία εφαρμογή τους στις μεταλλικές κατασκευές, κυρίως εξαιτίας των επιφυλάξεων ως προς την ανθεκτικότητά τους, της έλλειψης κανόνων σχεδιασμού και των καινοτομιών στο τομέα των συμβατικών συγκολλήσεων. Επιπλέον, η δημιουργία κανονισμών και προτύπων για τις αντοχές των κολλών αλλά και η διερεύνηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων και της συμπεριφοράς τους σε πυρκαγιά είναι απαραίτητες για την ευρύτερη χρήση τους

Η πρόοδος της έρευνας στον τομέα των συγκολλήσεων με χρήση συγκολλητικών ουσιών, η προώθηση των ελαφρών κατασκευών αλλά και οι υψηλές αισθητικές απαιτήσεις κάνουν τη χρήση των συγκολλητικών ουσιών στον κατασκευαστικό κλάδο ολοένα και πιο ελκυστική. Ιδιαίτερη βαρύτητα θα πρέπει να δίνεται στο είδος της κατασκευής, στην επιλογή της κόλλας, στην κατάλληλη επεξεργασία των προς συγκόλληση επιφανειών και στην κόλληση υπό εργοστασιακές συνθήκες. Για τον προσδιορισμό της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης των συγκολλητικών ουσιών πραγματοποιούνται πειράματα, προκειμένου να γίνει σύγκριση με άλλα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα.

1.3. Συγκόλληση με χρήση συγκολλητικών ουσιών

Όπως είναι γνωστό, μια απλή μεταλλική κατασκευή αποτελείται από τεγίδες και μηκίδες, πάνω στις οποίες τοποθετούνται οι προσόψεις του κτιρίου. Συνήθως αυτό γίνεται με χρήση κοχλιών ή ειδικών καρφιών, που καθιστά συνήθως το κτίριο αισθητικά μη αποδεκτό. Πλέον όμως παρέχεται η δυνατότητα να αποφευχθούν οι αντιαισθητικές συγκολλήσεις και να αντικατασταθούν από διαφανείς κόλλες. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τρύπες, πιθανά χτυπήματα και γρατζουνιές από τους κοχλίες στις προσόψεις, κάτι που μπορεί να επηρεάσει ακόμα και την αντοχή του ίδιου του κτιρίου. Τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματα κάνουν τις μεταλλικές κατασκευές πιο ελκυστικές για περισσότερες εφαρμογές, πέραν των συνήθων βιομηχανικών κτιρίων.



Εικόνα 1.5: Προβλήματα σε συνδέσεις με κοχλίες
Figure 1.5: Problems with rusted bolts

1.4. Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλει στην εδραίωση της κόλλας ως τρόπου συγκόλλησης στις μεταλλικές κατασκευές.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η καταλληλότητα μιας κόλλας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή θα πρέπει να υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τη συμπεριφορά της σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας. Για το σκοπό αυτό απαιτείται κατ' αρχήν η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς της κόλλας, προκειμένου βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων να κατασκευαστεί η καμπύλη αναφοράς της, η οποία μας επιτρέπει να γνωρίζουμε πώς θα συμπεριφερθεί η συγκόλληση σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης και θερμοκρασίας.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η αντοχή μιας συγκεκριμένης κόλλας, μέσω πειραμάτων εφελκυσμού σε διάφορες θερμοκρασίες και κατασκευάστηκε η καμπύλη αναφοράς της, η οποία επαληθεύτηκε και αριθμητικά με εφαρμογή προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.

Συγκεκριμένα, σε χαλύβδινα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αντοχής μιας συγκεκριμένης κόλλας, σε οκτώ (8) διαφορετικές θερμοκρασίες και σε τρεις (3) διαφορετικές ταχύτητες εφελκυσμού για κάθε θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων (οκτώ (8) σειρές των εννέα (9) πειραμάτων) χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό της καμπύλης αναφοράς (μητρική καμπύλη) της κόλλας που μελετήθηκε.

Προκειμένου να σχεδιαστούν και να πραγματοποιηθούν τα απαιτούμενα πειράματα είναι βασικό να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των υφιστάμενων κατασκευών, οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, προκειμένου να εκτιμηθούν οι πραγματικές θερμοκρασίες και ταχύτητες των ασκούμενων δυνάμεων.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. Γενικά στοιχεία για τα πολυμερή

Ετυμολογικά η λέξη πολυμερές προκύπτει από το πολύ και το μέρος, δηλαδή ένα πολυμερές αποτελείται από πολλά μέρη. Σήμερα είναι γνωστό ότι τα πολυμερή είναι γιγαντιαία μόρια ή αλλιώς μακρομόρια, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς.

Τα μόρια που χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό του πολυμερούς ονομάζονται μονομερή. Ο όρος όμως πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή γιατί κατά τον πολυμερισμό τα μονομερή μόρια χάνουν κάποια άτομά τους. Έτσι η δομική μονάδα του πολυμερούς μπορεί να διαφέρει από το αρχικό μονομερές

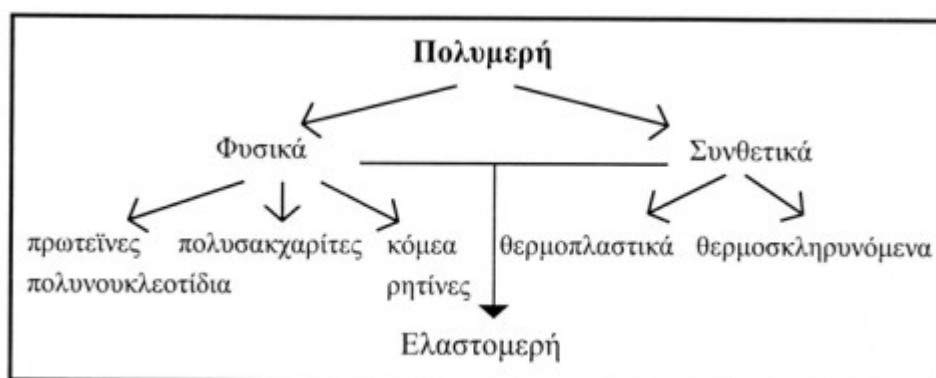
Υπάρχουν πέντε κύριες περιοχές εφαρμογής των πολυμερών:

- Πλαστικά
- Ελαστομερή
- Ίνες
- Επικαλυπτικά
- Συγκολλητικά

Παρά το γεγονός ότι και οι πέντε αυτές κατηγορίες έχουν ως βάση τα πολυμερή και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις το ίδιο πολυμερές χρησιμοποιείται σε περισσότερες από μια εφαρμογές, οι κλάδοι αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Με την εδραίωση της αντίληψης του μακρομοριακού χαρακτήρα των πολυμερών άρχισε και η ανάπτυξη της Επιστήμης των Πολυμερών, η οποία συνένωσε τους παραπάνω κλάδους.

2.1.1. Κατάταξη πολυμερών

Ένας εύχρηστος τρόπος κατάταξης των πολυμερών φαίνεται στο Διάγραμμα 2.1:



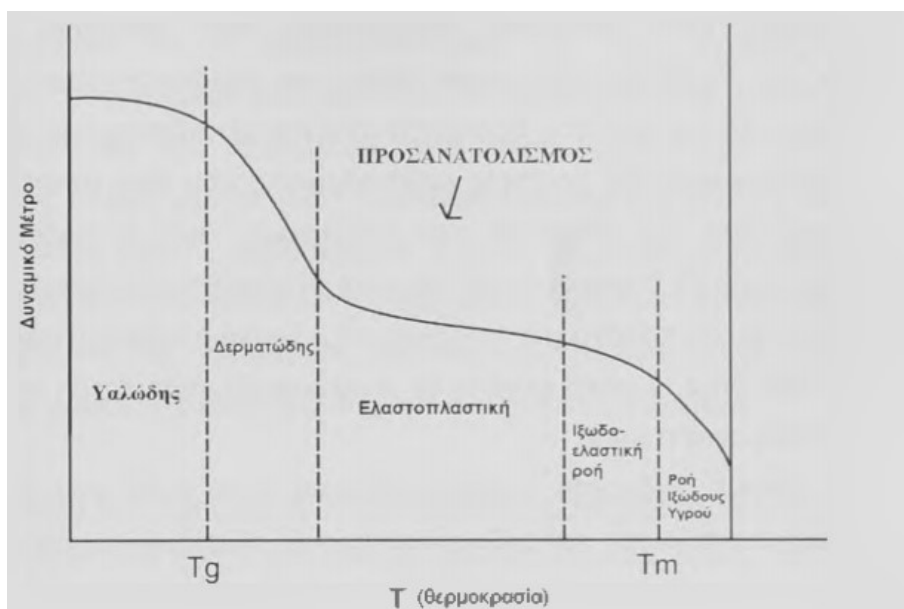
Διάγραμμα 2.1: Κατηγοριοποίηση Πολυμερών
Diagram 2.1: Categorization of Polymers

Τα φυσικά πολυμερή έχουν συνήθως περισσότερο πολύπλοκες δομές από τα συνθετικά πολυμερή. Τα ελαστομερή μπορεί να είναι τόσο φυσικά όσο και συνθετικά και έτσι κατατάσσονται ως κοινή υποομάδα.

Ένα θερμοπλαστικό πολυμερές γίνεται μαλακό και ευκατέργαστο όταν θερμανθεί πάνω από μια χαρακτηριστική θερμοκρασία. Ψυχόμενο το θερμοπλαστικό γίνεται πάλι σκληρό και δύσκαμπτο. Αν ξαναθερμανθεί γίνεται και πάλι μαλακό και ευκατέργαστο. Αντίθετα, ένα θερμοσκληρηνόμενο υλικό καθίσταται μονίμως σκληρό, όταν θερμαίνεται πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία. Ψυχόμενο το θερμοσκληραινόμενο υλικό ή εκ νέου θερμαινόμενο δε μαλακώνει. Λόγω αυτής της ιδιότητας, τα θερμοσκληρηνόμενα υλικά μορφοποιούνται κατά την πρώτη τους θέρμανση. Αντίθετα τα θερμοπλαστικά υλικά μπορούν να μορφοποιηθούν κάθε φορά που θερμαίνονται σε κατάλληλη θερμοκρασία.

Τα πολυμερή που έχουν τη δυνατότητα να κρυσταλλωθούν ονομάζονται κρυσταλλικά πολυμερή. Τα πολυμερή που δεν εμφανίζουν κρυσταλλικότητα ονομάζονται άμορφα πολυμερή. Αν και στα κρυσταλλικά πολυμερή αποδίδεται ένα σημείο τήξης, T_m , είναι ορθότερο να μιλάμε για μια περιοχή τήξης, η οποία είναι διαφορετική από την περιοχή κρυστάλλωσης του πολυμερούς, σε αντίθεση με τη συμπεριφορά των μικρών μορίων, όπου το σημείο τήξης είναι ταυτόσημο με το σημείο κρυστάλλωσης.

Τα άμορφα πολυμερή δεν εμφανίζουν σημείο τήξης, εμφανίζουν όμως μια μετάπτωση κεφαλαιώδους σημασίας για τη θερμομηχανική συμπεριφορά των πολυμερών. Η μετάπτωση αυτή ονομάζεται υαλώδης μετάπτωση ή υαλώδης μετάβαση (glass transition) και η θερμοκρασία στην οποία συντελείται ονομάζεται θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, T_g . Κάτω από την T_g τα πολυμερή εμφανίζονται ως σκληρά υαλώδη υλικά με διαστατική σταθερότητα. Στην περιοχή της υαλώδους μετάπτωσης το μέτρο ελαστικότητας των πολυμερών μειώνεται δραματικά προσδίδοντας ένα χαρακτήρα δερματώδους υλικού. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τον ελαστικό χαρακτήρα του υλικού μέχρι τη ρευστοποίησή του.



Διάγραμμα 2.2: Οι πέντε περιοχές ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των πολυμερών
Diagram 2.2: The five regions of the viscoelastic behavior of Polymers

Η ιδιοτυπία της υαλώδους μετάπτωσης δεν είναι η μόνη ιδιοτυπία των πολυμερών. Η γενικότερη θερμομηχανική τους συμπεριφορά εμπίπτει ανάμεσα στην

συμπεριφορά των ελαστικών στερεών και των ιξωδών ρευστών, είναι δηλαδή ιξωδοελαστικά υλικά.

2.1.2. Μεταπτώσεις Πολυμερών

Για την κατανόηση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερών είναι απαραίτητη η κατανόηση των διαφόρων τύπων μεταπτώσεων (transitions) που συμβαίνουν στη φυσική κατάσταση των υλικών αυτών. Οι μεταπτώσεις αυτές συντελούνται καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία, η εξωτερική μηχανική τάση ή η κλίμακα χρόνου του πειράματος, που πραγματοποιείται για τη μέτρηση της κάθε μετάπτωσης. Στις μεταπτώσεις περιλαμβάνονται:

- Η τήξη κρυστάλλων
- Οι κρυσταλλικές μεταπτώσεις πρώτης τάξης
- Οι υαλώδεις μεταπτώσεις
- Οι δευτερεύουσες υαλώδεις μεταπτώσεις

Σχεδόν όλες οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών καθορίζονται από αυτές τις μεταπτώσεις και τις θερμοκρασίες στις οποίες συμβαίνουν. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τις υαλώδεις μεταπτώσεις, καθώς αυτές μας απασχόλησαν κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας.

Υαλώδεις μεταπτώσεις

Μερικά υγρά μπορεί να υποψυχθούν και να μετατραπούν σε ύαλο χωρίς να λάβει χώρα κρυστάλλωση κατά την ψύξη. Σε στενή περιοχή θερμοκρασιών, γύρω από μια χαρακτηριστική θερμοκρασία T_g , μερικές ιδιότητες των υλικών αυτών, όπως ιξώδες, θερμοχωρητικότητα, συντελεστής θερμικής διαστολής κλπ., υφίστανται μια απότομη αλλαγή, ενώ άλλες ιδιότητες, όπως όγκος, ενθαλπία, εντροπία, αλλάζουν βαθμιαία. Η θερμοκρασία T_g ονομάζεται, όπως προαναφέρθηκε, θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του υλικού.

Όλα τα πολυμερή εμφανίζουν υαλώδη μετάπτωση σε συγκεκριμένη για κάθε υλικό θερμοκρασία.

2.1.3. Μηχανικές Ιδιότητες Πολυμερών

Από το σύνολο των μηχανικών ιδιοτήτων των πολυμερών αυτές που μας απασχόλησαν στην παρούσα εργασία είναι η ελαστομερής κατάσταση και η ιξωδοελαστικότητα.

Ελαστομερής Κατάσταση

Τα περισσότερα στερεά, όταν υποβάλλονται σε τανυσμό, εμφανίζουν αρχικά και για περιορισμένο εύρος τάσεων, ελαστική συμπεριφορά. Όταν δηλαδή η τάση αφαιρείται, το στερεό ανακτά τις αρχικές του διαστάσεις. Δεδομένου ότι η παραμόρφωση που προκύπτει σχετίζεται με την μετακίνηση των ατόμων και των μορίων του στερεού από τις θέσεις ισορροπίας τους, υλικά όπως το μέταλλο και το γυαλί, εμφανίζουν ελαστική παραμόρφωση. Στα πολυμερή όμως, υπό ορισμένες συνθήκες η κατάσταση είναι διαφορετική. Λόγω της φύσης τους, των ομοιοπολικών

δεσμών και της δυνατότητας περιστροφής γύρω από απλούς δεσμούς, οι μακριές αλυσίδες μπορούν να εμφανίσουν σημαντική παραμόρφωση.

Ένα πολυμερές χαρακτηρίζεται ως ελαστομερές, όταν είναι ικανό να υποστεί πολύ μεγάλες και αντιστρεπτές παραμορφώσεις χωρίς να υποστεί θραύση, υπό την επίδραση σχετικά μικρών τάσεων.

Ιξωδοελαστικότητα

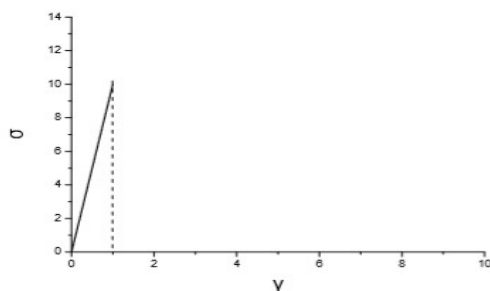
Η ιξωδοελαστικότητα αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα των πολυμερών. Μαζί με τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και το μοριακό βάρος αποτελούν, ίσως, τις σημαντικότερες ιδιότητες των πολυμερών. Γενικά, τα ιδανικά στερεά είναι υλικά που παραμορφώνονται ελαστικά. Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για την παραμόρφωση, ανακτάται πλήρως όταν αφαιρεθούν οι τάσεις. Αντίθετα τα ιδανικά ρευστά παραμορφώνονται αναντίστρεπτα. Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για την παραμόρφωση, μεταπίπτει σε θερμική ενέργεια (viscous dissipation) και δεν ανακτάται όταν αφαιρεθούν οι τάσεις. Τα πολυμερή είναι ιξωδοελαστικά υλικά, δεδομένου ότι σε ασκούμενη μηχανική τάση παρουσιάζουν τόσο ιξώδη όσο και ελαστική παραμόρφωση. Έχουν δηλαδή χαρακτηριστικά ιξωδών υγρών και ελαστικών στερεών. Τα πρώτα δεν έχουν σαφώς καθορισμένο σχήμα και παραμορφώνονται αναντίστρεπτα. Τα δεύτερα έχουν σαφώς καθορισμένο σχήμα και παραμορφώνονται υπό την επίδραση εξωτερικών μηχανικών δυνάμεων, ακαριαία και αντιστρεπτά. Ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη χρονική κλίμακα του πειράματος, τα πολυμερή μπορούν να επιδείξουν όλη την ενδιάμεση περιοχή ιδιοτήτων από το ελαστικό στερεό μέχρι το ιξώδες υγρό.

2.1.4. Μηχανική αστοχία Πολυμερών

Τυπικά διαγράμματα τάσης (σ) - ανοιγμένης επιμήκυνσης (γ) διαφόρων πολυμερών κάτω από την επίδραση εφελκυστικής τάσης φαίνονται στα Διαγράμματα 2.3-2.8. Στη συμπεριφορά του υλικού κατά τη μηχανική καταπόνηση, πολύ σημαντική είναι η επίδραση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασής του, T_g .

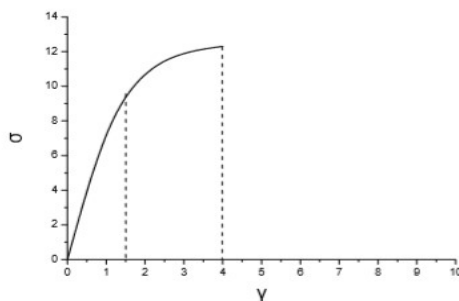
- Όταν σε ένα υλικό, η T_g είναι πολύ υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος τότε το υλικό είναι σκληρό και εύθραυστο (ψαθυρό). Η παραμόρφωση, δηλαδή, που υφίσταται είναι πολύ μικρή ακόμη και με μεγάλη

εφαρμογή τάσης, μέχρι το σημείο θραύσης του (ιδανικό ελαστικό στερεό) (Διάγραμμα 2.3).



Διάγραμμα 2.3: Σκληρά και εύθραυστα
Diagram 2.3: Hard and fragile

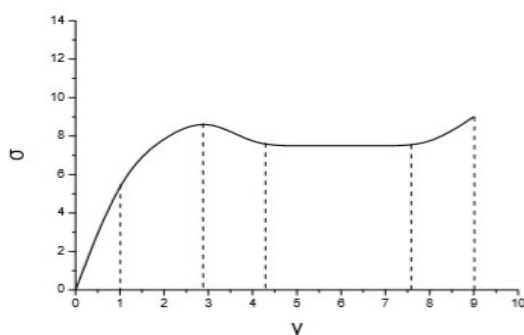
- Όταν η T_g του υλικού είναι και πάλι υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά μικρότερη από την προηγούμενη περίπτωση, ($T < T_g$), τότε τα υλικά χαρακτηρίζονται ως σκληρά και στιβαρά και εμφανίζουν εκτός της γραμμικής μεταβολής του ελαστικού στερεού και μία περιοχή μεταβολής της παραμόρφωσης, όπου εμφανίζουν ελαστομερή συμπεριφορά, έχουμε, δηλαδή, μεγαλύτερη παραμόρφωση με την εφαρμογή τάσης (Διάγραμμα 2.4). Το υλικό φθάνει πάλι στο σημείο θραύσης, όπου σπάει.



Διάγραμμα 2.4: Σκληρά και στιβαρά
Diagram 2.4: Hard and robust

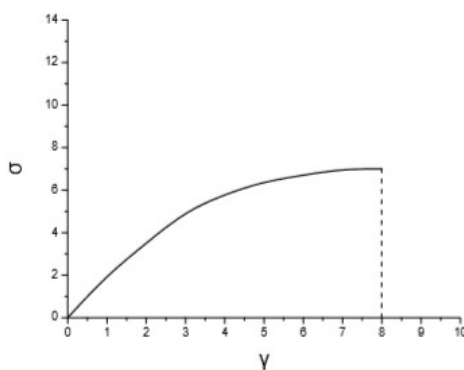
- Σε πολυμερή με T_g κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος η συμπεριφορά σε μηχανική καταπόνηση είναι περισσότερο πολύπλοκη. Στην περίπτωση αυτή μετά την ελαστική και ελαφρώς ελαστομερή συμπεριφορά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, παρατηρείται μια μείωση της τάσης με αύξηση της παραμόρφωσης. Στο σημείο αυτό έχουμε τη δημιουργία λαιμού στο δοκίμιο. Το σημείο αυτό λέγεται σημείο διαρροής. Τα μακρομόρια μέσα στο υλικό αλλάζουν διαμορφώσεις και από τυχαία διευθέτηση στο χώρο τείνουν να πάρουν κατεύθυνση αντίστοιχη με την εφαρμοζόμενη τάση. Όσο διαρκεί η δοκιμή όλο και περισσότερες μακρομοριακές αλυσίδες διευθετούνται παράλληλα με την εφαρμοζόμενη τάση. Έτσι το υλικό παραμορφώνεται (επιμηκώνεται) χωρίς την ανάγκη εφαρμογής επιπλέον τάσης. Από κάποιο σημείο και μετά το υλικό συμπεριφέρεται και πάλι σαν ελαστικό στερεό, με

μικρή αύξηση της παραμόρφωσης με αύξηση της τάσης μέχρι το σημείο θραύσης (Διάγραμμα 2.5). Τα υλικά λέγονται σκληρά και ανθεκτικά.

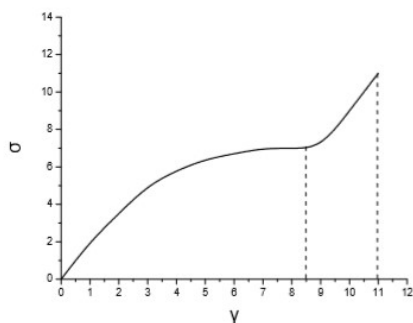


Διάγραμμα 2.5: Σκληρά και ανθεκτικά
Diagram 2.5: Hard and durable

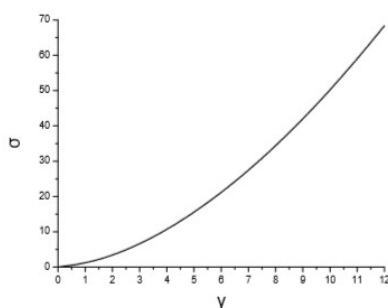
- Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι πάνω από την T_g του πολυμερούς τότε το υλικό χαρακτηρίζεται ως ελαστομερές. Χρειάζεται, επομένως, μικρή τάση για να έχουμε σημαντική παραμόρφωση. Όταν η $T > T_g$ το υλικό χαρακτηρίζεται ως μαλακό και ασθενές. Σε πολυμερή με ακόμη πιο χαμηλές T_g , μετά την καθαρά ελαστομερή συμπεριφορά, εμφανίζεται και μια ελαστική, με γραμμική αύξηση της τάσης ως προς την παραμόρφωση μέχρι το σημείο θραύσης. Τα υλικά αυτά λέγονται μαλακά και ανθεκτικά. Τέλος, τα πολυμερή με πολύ χαμηλή T_g είναι τα καθαρά ελαστομερή, τα οποία εμφανίζουν μεγάλη παραμόρφωση με μικρή εφαρμογή τάσης (Διαγράμματα 2.6-2.8).



Διάγραμμα 2.6: Μαλακά και ασθενή ($T > T_g$)
Diagram 2.6: Soft ($T > T_g$)



Διάγραμμα 2.7: Μαλακά και ανθεκτικά ($T > T_g$)
Diagram 2.7: Soft and durable ($T > T_g$)



Διάγραμμα 2.8: Ελαστομερή ($T \gg T_g$)
Diagram 2.8: Elastomers ($T \gg T_g$)

2.2. Γενικά στοιχεία για τις κόλλες

2.2.1. Ορισμός

Κόλλα ονομάζεται κάθε ουσία η οποία χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση επιφανειών. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από κόλλες, ειδικές για κάθε εφαρμογή. Για παράδειγμα υπάρχουν κόλλες για ξύλα, για μέταλλα, για γυαλιά κ.λπ. Οι κόλλες είναι ουσίες οι οποίες όταν έλθουν σε επαφή με τον αέρα ή με άλλο υλικό, σκληραίνουν και συγκολλούν τις επιφάνειες με τις οποίες βρίσκονται σε επαφή.

2.2.2. Κατηγοριοποίηση

Έχουν επικρατήσει δύο τρόποι κατηγοριοποίησης των συγκολλητικών ουσιών:

- Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση
- Ανάλογα με τον τρόπο στερεοποίησης

Ανάλογα με τη χημική σύσταση

Οι κόλλες διακρίνονται με βάση τη χημική τους σύσταση σε κόλλες που παράγονται από οργανικές και σε κόλλες που παράγονται από ανόργανες χημικές ενώσεις. Στις ανόργανες ανήκουν κόλλες από οξείδια μετάλλου, βορικά, φωσφορικά και πυριτικά άλατα. Οι οργανικές διαχωρίζονται σε αυτές που παράγονται από φυσική και αυτές από συνθετική πρώτη ύλη. Στις φυσικές ανήκουν κόλλες από φυσικές ρητίνες, από πρωτεΐνη και από υδατάνθρακες ενώ στις συνθετικές ανήκουν κόλλες από

ενώσεις άνθρακα με στοιχεία όπως υδρογόνο, θείο, άζωτο και χλώριο. Τέλος, μια ξεχωριστή κατηγορία αποτελούν οι κόλλες από σιλικόνη καθώς αυτές συνδυάζουν χαρακτηριστικά τόσο των ανόργανων όσο και των οργανικών κολλών.

Ανάλογα με τον τρόπο στερεοποίησης

Για το διαχωρισμό αυτό σημαντικό ρόλο παίζουν:

- Η μοριακή κατάσταση της κόλλας στην αρχή της συγκόλλησης
- Ο αριθμός των συστατικών που συμμετέχουν στην αντίδραση

Με βάση τον τρόπο στερεοποίησης οι κόλλες χωρίζονται σε χημικώς αντιδρώσες, σε φυσικώς στερεοποιούμενες και σε κόλλες θερμής τήξης. Οι χημικώς αντιδρώσες κόλλες χωρίζονται σε στερεοποιούμενες εν ψυχρώ ή εν θερμώ (θερμοσκληραινόμενες). Υποκατηγορίες των προαναφερθέντων είναι κόλλες που παράγονται μέσω αντιδράσεων πολυσυμπύκνωσης, πολυπροσθήκης ή αλυσωτού πολυμερισμού. Στις φυσικώς στερεοποιούμενες κόλλες ανήκουν κόλλες από τήξη, ανάμειξης με νερό και κόλλες που ενεργοποιούνται με τη χρήση διαλύτη.

2.2.3. Δομή των συγκολλητικών ουσιών

Γενικά η χημική δομή της κάθε οργανικής κόλλας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πρώτη ύλη και τον τρόπο μορφοποίησης. Η διαδικασία παραγωγής μιας κόλλας οδηγεί στις διάφορες μοριακές δομές, οι οποίες τελικά προσδιορίζουν και τις ιδιότητές της. Για την καλύτερη κατανόηση της χημικής δομής της κάθε κόλλας θα πρέπει να γνωρίζουμε:

- Τη χημική δομή του καθενός μονομερούς
- Το συγκεκριμένο μηχανισμό πολυμερισμού
- Τη δομή του πολυμερούς

Ορισμοί

Μονομερές: Είναι η χημική ένωση από την οποία συντίθεται το πολυμερές. Ένα μονομερές μόριο είναι ένα μόριο που μπορεί να υποβληθεί σε πολυμερισμό και με αυτόν τον τρόπο να συνεισφέρει δομικές μονάδες στη βασική δομή ενός μακρομορίου (ορισμός IUPAC).

Πολυμερές: Ένα υλικό που αποτελείται από μεγάλα μόρια, τα λεγόμενα μακρομόρια, που σχηματίζεται από τη σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων, που ονομάζονται δομική μονάδα. Τα πολυμερή προκύπτουν από τη χημική αντίδραση των μονομερών, που ονομάζεται πολυμερισμός.

Χημική δομή μονομερούς

Τα βασικά στοιχεία της δομής των κολλών από οργανικές ενώσεις είναι το ο άνθρακας, το υδρογόνο, το οξυγόνο, το άζωτο, το χλώριο, το θείο και το πυρίτιο. Η ποικιλία των αντιδράσεων που προκύπτουν από την ένωση των παραπάνω στοιχείων μεταξύ τους οδηγεί στην παραγωγή διαφορετικών ειδών κόλλας. Καθοριστική για τη μετατροπή ενός μονομερούς μορίου σε μια πολυμερή ένωση είναι η ύπαρξη δραστικών ομάδων στο μόριο του μονομερούς. Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, ακόμα και

εάν είναι γνωστή η χημική σύσταση μίας κόλλας δεν είναι γνώστη η πλήρης συμπεριφορά της, καθώς αυτή εξαρτάται άμεσα από τα προς συγκόλληση υλικά. Όμως, αυτή η κατ' αρχήν γνώση της χημικής δομής των μονομερών από τα οποία αποτελείται μια κόλλα είναι αρκετά σημαντική, αφού μας επιτρέπει να γνωρίζουμε βασικά χαρακτηριστικά της, όπως η θερμομηχανική συμπεριφορά. Σε περίπτωση που δεν έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα μπορούμε να τροποποιήσουμε την ένωση προσθέτοντας καταλύτες, σταθεροποιητές κ.ο.κ.

Δομή πολυμερούς

Όπως προαναφέρθηκε ένα πολυμερές προκύπτει από την ένωση πολλών μονομερών, μέσω διαφόρων χημικών αντιδράσεων. Οι χημικές αυτές αντιδράσεις είναι:

- Ο αλυσωτός πολυμερισμός
- Η πολυσυμπύκνωση
- Η πολυπροσθήκη

Κάθε μία από τις παραπάνω χημικές αντιδράσεις δημιουργεί διαφορετικές δομές μακρομορίων, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν σε διαφορετικά πολυμερή. Οι τρεις μορφές των δημιουργούμενων μακρομορίων είναι:

- *Γραμμικό (linear)*: Τα μόριά του έχουν τη μορφή απλής αλυσίδας και αναπτύσσονται σε μία διάσταση του χώρου (πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο, πολυαμίδια).
- *Διακλαδωμένο (branched)*: Τα μόριά του έχουν τη μορφή κλάδων δέντρου, αποτελούνται από μία βασική αλυσίδα από την οποία αναπτύσσονται πλευρικές διακλαδώσεις (που δεν ανήκουν στη δομή του μονομερούς) και αναπτύσσονται σε δύο διαστάσεις του χώρου (συμπολυμερές αιθυλενίου-εξενίου).
- *Δικτυωτό ή διασταυρούμενο (crosslinked) ή πλέγμα (network)*: Τα μόριά του αποτελούνται από αλυσίδες που συνδέονται μεταξύ τους με διασταυρώσεις σχηματίζοντας πλέγμα (πολυεστέρες, πολυουρεθάνες, εποξειδικές ενώσεις, φορμοφαινόλη). Αναπτύσσονται στις τρεις διαστάσεις του χώρου.

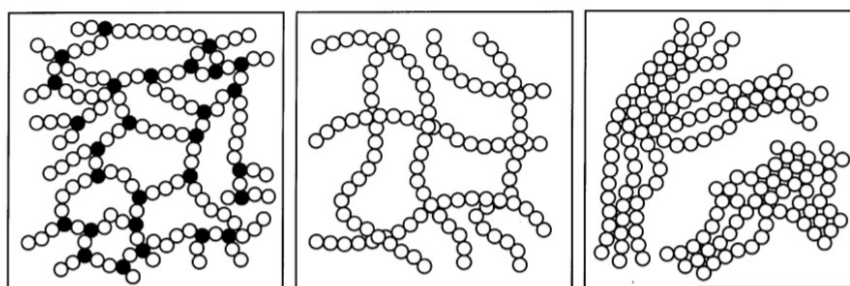
Ανάλογα με τη μορφή των μακρομορίων οι χημικές, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων πολυμερών μπορεί να είναι τελείως διαφορετικές. Ένας γενικός διαχωρισμός των πολυμερών αναλόγως τη μορφή των μακρομορίων από τα οποία αποτελούνται και τη συμπεριφορά τους κατά τη θέρμανση ή την ψύξη είναι:

- *Τα θερμοπλαστικά*: είναι πλαστικά υλικά που γίνονται ευλύγιστα ή εύπλαστα πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και στερεοποιούνται με ψύξη. Τα θερμοπλαστικά μπορούν να ανασχηματιστούν με θέρμανση και είναι κατάλληλα για μορφοποίηση με έγχυση.
- *Τα θερμοσκληραινόμενα*: κατά την πρώτη θέρμανση και ανάμιξη των συστατικών τους προκαλείται πολυμερισμός και σκλήρυνση κατά τρόπο *μη αντιστρεπτό* (σχηματισμός μη αναστρέψιμων χημικών δεσμών). Τα θερμοσκληραινόμενα δεν τήκονται, αλλά αποσυντίθενται και δεν ανασχηματίζονται με θέρμανση. Δηλαδή, τα θερμοσκληραινόμενα μετά τη στερεοποίησή τους δεν δύνανται να μορφοποιηθούν περαιτέρω. Συνεπώς, κατά

τη χρήση τέτοιων υλικών σε μια συγκόλληση πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί καθώς η συμπεριφορά τους ενδέχεται να είναι ψαθυρή.

- Τα ελαστομερή: είναι πολυμερή με ιξωδοελαστικότητα, πολύ ασθενείς διαμοριακές δυνάμεις και γενικά έχουν χαμηλό Μέτρο Young και υψηλή έλλειψη τάσης συγκρινόμενα με άλλα υλικά. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι σχετικά μαλακά και μορφοποιήσιμα. Τα ελαστομερή είναι συνήθως θερμοσκληραινόμενα αλλά μπορεί να είναι επίσης θερμοπλαστικά. Οι μεγάλες αλυσίδες πολυμερούς διασταυρώνονται κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης (βουλκανισμός). Τα ελαστομερή μπορούν να εκταθούν/επιμηκυνθούν αντιστρεπτά από 500-700%, ανάλογα με το συγκεκριμένο υλικό. Ο όρος, που προέρχεται από το ελαστομερές, χρησιμοποιείται συχνά εναλλακτικά με τον όρο συνθετικό καουτσούκ.

Στις διαδικασίες συγκόλλησης χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα θερμοπλαστικά και θερμοσκληραινόμενα πολυμερή με εξαίρεση τις σιλικόνες και τις πολυουρεθάνες.



Εικόνα 2.1: Δομή Πολυμερών (Αριστερά: Θερμοσκληραινόμενο (άμορφη δομή), Κέντρο: Θερμοπλαστικό (άμορφη δομή), Αριστερά: Θερμοπλαστικό (ημικρυσταλλική δομή))

Figure 2.1: Polymer Structure (Left: Thermosetting (amorphous structure), Center: Thermoplastic (amorphous structure), Left: Thermoplastic (semi-crystalline structure))

2.2.4. Μηχανικές ιδιότητες συγκολλητικών στρωμάτων

Οι μηχανικές ιδιότητες μιας συγκόλλησης είναι άμεσα συνδεδεμένες με το υλικό και το είδος των προς συγκόλληση επιφανειών. Η κόλλα δηλαδή δεν μπορεί να εξεταστεί ως ανεξάρτητο υλικό. Συνεπώς, μόνο γνωρίζοντας τη φύση του υλικού το οποίο συγκολλάται μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την αντοχή και τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες μιας συγκεκριμένης συγκόλλησης. Τέτοιες ιδιότητες είναι:

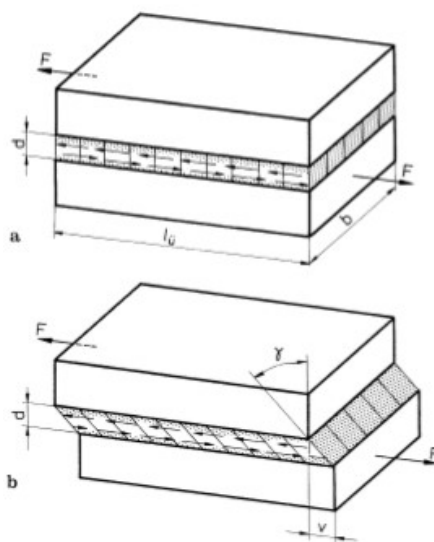
- Το μέτρο διάτμησης (G)
- Η σχέση διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης
- Οι θερμομηχανικές ιδιότητες της κόλλας
- Το μέτρο ελαστικότητας (E)
- Ο ερπυσμός
- Η κρυσταλλικότητα
- Η ομοιογένεια

Από τις παραπάνω ιδιότητες εξαρτώνται τελικά, αναλόγως το είδος της κόλλας που θα χρησιμοποιηθεί, οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μιας συγκόλλησης. Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται επιπλέον σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες σκλήρυνσης της κόλλας, δηλαδή τη θερμοκρασία, το χρόνο και την πίεση. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμεύσουν σαν βάσεις για τη διεξαγωγή των απαραίτητων πειραμάτων αλλά και για την εξαγωγή πιο ολοκληρωμένων συμπερασμάτων. Γενικώς, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα θερμοσκληραινόμενα πολυμερή, λόγω της δικτυωτής τους μορφής έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τα θερμοπλαστικά, τα οποία επηρεάζονται επίσης και από φαινόμενα ερπυσμού.

Μέτρο διάτμησης

Το μέτρο διάτμησης ορίζεται ως το πηλίκο της διατμητικής τάσης (τ) προς τη διατμητική παραμόρφωση ($\tan\gamma$), δηλαδή την ολίσθηση.

$$G = \frac{\tau}{\tan\gamma} \quad (2.1)$$



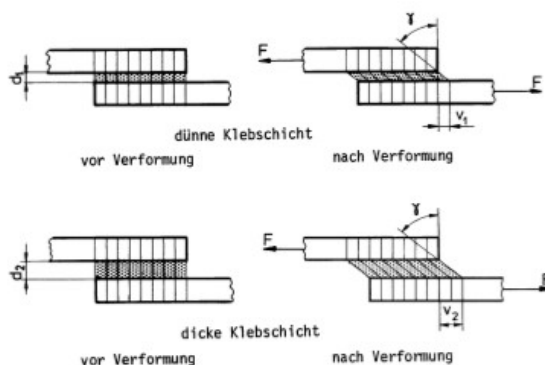
Εικόνα 2.2: Διατμητική παραμόρφωση σε ένα συγκολλητικό στρώμα
Figure 2.2: Shear strain in an adhesive layer

Η ολίσθηση ορίζεται ως: $\tan\gamma = \frac{v}{d}$, οπότε τελικά το μέτρο διάτμησης μπορεί να γραφτεί σαν $G = \frac{\tau \cdot d}{v}$. Για μικρή μετατόπιση (v) έχουμε ελαστική παραμόρφωση, ενώ για πιο μεγάλες μετατοπίσεις έχουμε πλαστική συμπεριφορά. Η αντοχή σε διατμητική τάση είναι μεγαλύτερη όσο πιο ελαστικά συμπεριφέρεται το κολλητικό στρώμα. Επίσης, η διατμητική παραμόρφωση (γ) μιας κολλητικής ουσίας εξαρτάται από το βαθμό δικτύωσής της. Ο βαθμός δικτύωσης είναι αλληλένδετος με τη θερμοκρασία και τη δομή του πολυμερούς (θερμοπλαστικό, θερμοσκληραινόμενο). Συνεπώς, για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε επακριβώς το μέτρο διάτμησης ενός κολλητικού στρώματος θα πρέπει να γνωρίζουμε τις συγκεκριμένες ιδιότητές του. Ενδεικτικές τιμές του μέτρου διάτμησης των πολυμερών είναι από 100-1000 MPa και υπολογίζονται σύμφωνα με το DIN 53445 μέσω δοκιμών στρέψης.

Η σχέση διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης

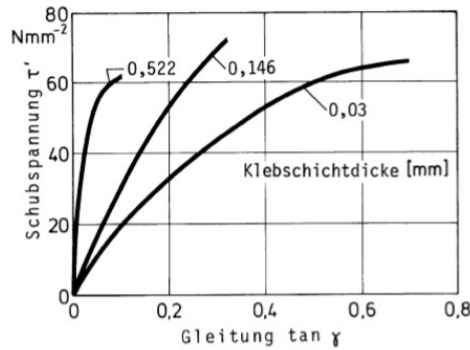
Συνήθως οι σχέσεις τάσεων - παραμορφώσεων λαμβάνονται στα στοιχεία από χάλυβα μέσω δοκιμών εφελκυσμού με βάση το DIN 50145. Από αυτές τις δοκιμές μπορούμε να εξάγουμε όλα τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν, όπως το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης ή το σημείο θραύσης. Όμως, στην περίπτωση της συγκόλλησης με κόλλα κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό καθώς υπεισέρχεται ένας νέος παράγοντας που θα παίξει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή του δοκιμίου/ συγκόλλησης, δηλαδή το είδος της κόλλας.

Για το είδος της κόλλας που θα χρησιμοποιηθεί σημαντικό ρόλο παίζει η διατμητική της αντοχή, αφού μας δίνει πληροφορίες για τη κατανομή τάσεων σε όλη την κολλητική επιφάνεια. Η αντοχή σε διατμητική τάση μπορεί να υπολογισθεί με βάση το πείραμα που περιγράφεται στο DIN 53281, όπου με την εισαγωγή δύο ίσων και αντίθετων δυνάμεων προκαλείται μια ροπή στο δοκίμιο από την οποία μπορούμε να μετρήσουμε την αντίστοιχη διατμητική παραμόρφωση. Βέβαια, ένα χαρακτηριστικό που αναφέρεται στο συγκεκριμένο πρότυπο είναι το πάχος της στρώσης που συγκολλάται στο οποίο πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή.



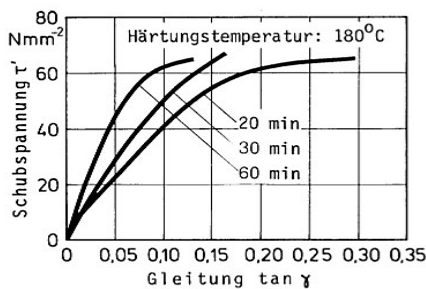
Εικόνα 2.3: Διατμητική παραμόρφωση σε λεπτό και παχύ συγκολλητικό στρώμα
Figure 2.3: Shear strain on a thin and thick adhesive layer

Αρχικά επικρατούσε η αντίληψη ότι σε ομογενή συγκολλητικά στρώματα το πάχος δεν επηρεάζει την διατμητική αντοχή και την διατμητική παραμόρφωση. Τελικώς όμως αποδείχθηκε, μέσω πειραμάτων ότι η αύξηση του πάχους αυξάνει την αντοχή σε διάτμηση λόγω κόπωσης, λαμβάνοντας όμως επιπλέον υπόψη ότι όσο μεγαλώνει το πάχος η πιθανότητα να υπάρχει ανομοιογένεια είναι μεγαλύτερη.

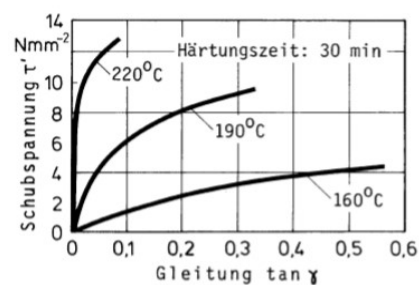


Διάγραμμα 2.9: Διάγραμμα διατμητικής αντοχής - διατμητικής παραμόρφωσης συναρτήσει του πάχους του συγκολλητικού στρώματος
Diagram 2.9: Shear stress - Shear Strain Diagram depending on the thickness of the adhesive layer

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι σημαντική επίδραση στη σχέση διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης, άρα και στη μορφή του αντίστοιχου διαγράμματος, έχει η θερμοκρασία σκλήρυνσης αλλά και ο χρόνος που απαιτήθηκε για τη σκλήρυνση της κόλλας.



Διάγραμμα 2.10: Επίδραση χρόνου σκλήρυνσης σε σταθερή θερμοκρασία
Diagram 2.10: Effect of hardening time at constant temperature

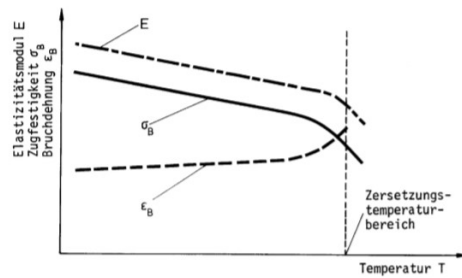


Διάγραμμα 2.11: Επίδραση θερμοκρασίας σκλήρυνσης σε σταθερό χρόνο.
Diagram 2.11: Effect of hardening temperature on fixed time.

Συμπερασματικά, η σχέση διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν και τη μορφή των αντίστοιχων καμπυλών. Η γνώση των καμπυλών αυτών είναι σημαντική για την επιλογή της κατάλληλης κόλλας για κάθε εφαρμογή.

Οι θερμομηχανικές ιδιότητες των κολλών

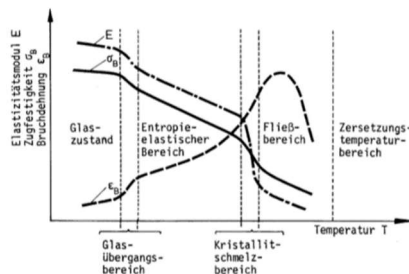
Είναι γεγονός ότι οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες τόσο των θερμοπλαστικών όσο και των θερμοσκληραινόμενων πολυμερών μεταβάλλονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η δομή των μορίων από τα οποία αποτελούνται τα πολυμερή συναρτάται άμεσα με τη θερμοκρασία και η σχέση αυτή θα δώσει τις τελικές μηχανικές ιδιότητες της κόλλας. Τα θερμοσκληραινόμενα πολυμερή, λόγω του μεγάλου βαθμού δικτύωσής των μορίων τους δεν επηρεάζονται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές.



Διάγραμμα 2.12: Παράμετροι αντοχής των θερμοσκληραινόμενων πολυμερών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

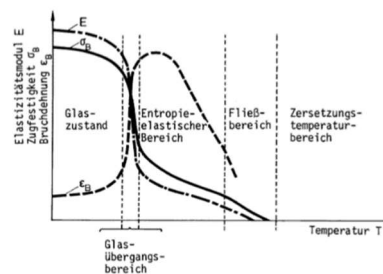
Diagram 2.12: Resistance parameters of thermoset polymers in relation to temperature.

Αντίθετα, τα θερμοπλαστικά πολυμερή υφίστανται σημαντικές αλλαγές λόγω της θερμοκρασιακής μεταβολής. Οι αλλαγές αυτές διαφοροποιούνται μεταξύ των άμορφων και των ημικρυσταλλικών πολυμερών.



Διάγραμμα 2.13: Παράμετροι αντοχής των ημικρυσταλλικών θερμοπλαστικών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Diagram 2.13: Resistance parameters of semi-crystalline thermoplastics in relation to temperature



Διάγραμμα 2.14: Παράμετροι αντοχής των άμορφων θερμοπλαστικών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Diagram 2.14: Resistance parameters of amorphous thermoplastics in relation to temperature

Και στις δύο όμως περιπτώσεις οι αλλαγές που υφίσταται το θερμοπλαστικό πολυμερές είναι παρόμοιες και αναλύονται παρακάτω:

Κατάσταση υάλου: Χαρακτηριστικό αυτής της κατάστασης είναι ότι το πολυμερές συμπεριφέρεται ελαστικά, σύμφωνα με το νόμο του Hooke και με ένα αρκετά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Το πολυμερές συμπεριφέρεται σε αυτή τη φάση φαθρά και δεν επηρεάζεται πολύ από τη θερμοκρασία.

Υαλώδης μετάπτωση (T_g): Στα θερμοσκληραινόμενα πολυμερή, λόγω του μεγάλου βαθμού δικτύωσης των μορίων τους αυτή η περιοχή είναι πολύ μικρή και συνεπώς αγνοείται. Τα θερμοπλαστικά όμως με την αύξηση της θερμοκρασίας μεταβαίνουν από την κατάσταση υάλου στην κατάσταση υαλώδους μετάπτωσης, όπου σηματοδοτείται και η αρχή σημαντικών μεταβολών των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων τους.

Η γνώση αυτής της θερμοκρασίας είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κολλών. Εάν για παράδειγμα αυτή είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία δωματίου τότε το υλικό δε μπορεί να βρει εφαρμογή, καθώς στη

θερμοκρασία εφαρμογής αυτό βρίσκεται σε κατάσταση υάλου και δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ισχυροί δεσμοί μεταξύ της κόλλας και των προς συγκόλληση υλικών.

Περιοχή ελαστοπλαστικότητας Στη θερμοκρασιακή αυτή περιοχή υπάρχει αύξηση της κινητικότητας των μορίων που αποτελούν το πολυμερές.

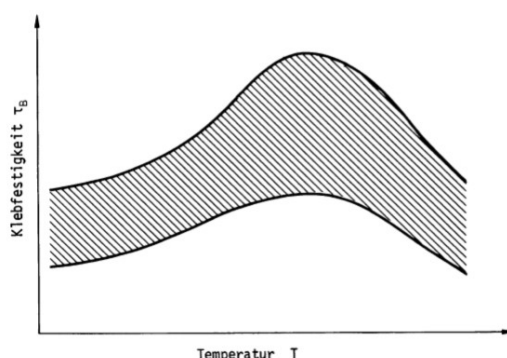
Κρυσταλλική περιοχή τήξης: Η κρυσταλλικότητα επηρεάζει τις ιδιότητες ενός θερμοπλαστικού πολυμερούς με πολλούς τρόπους. Όμως στα ημικρυσταλλικά πολυμερή η υαλώδης μετάπτωση είναι πιο ομαλή και δεν παρατηρείται μεγάλη αύξηση στην κινητικότητα των μακρομορίων.

Θερμοκρασία τήξης: Είναι η θερμοκρασία που διαχωρίζει την υγρή από τη στερεά κατάσταση του πολυμερούς. Τα μόρια από τα οποία αποτελείται το πολυμερές κινούνται ελεύθερα.

Ιξώδης συμπεριφορά: Είναι υπεύθυνη για τυχόν εμφάνιση ερπυσμού σε μια κόλλα και οδηγεί τα μόρια σε θέσεις που δεν είναι αντιστρεπτές.

Θερμοκρασία αποικοδόμησης: Από τη θερμοκρασία αυτή ξεκινάει η αποικοδόμηση του πολυμερούς.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε τη σχέση μεταξύ της αντοχής μιας κόλλας και της θερμοκρασίας. Στις χαμηλές θερμοκρασίες δεν παρατηρείται αύξηση της αντοχής, καθώς βρισκόμαστε στην κατάσταση υάλου. Με αύξηση της θερμοκρασίας είναι δυνατόν να επιτευχθεί αύξηση της αντοχής, η οποία να φτάσει σε ένα μέγιστο σημείο, που εξαρτάται από τη χημική σύσταση της κόλλας. Τελικά με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας ξεπερνάμε το μέγιστο σημείο της αντοχής και καταλήγουμε στη θερμοκρασία θραύσης (Διάγραμμα 2.15).



Διάγραμμα 2.15: Συναρτηση αντοχής κόλλας με τη θερμοκρασία, μαλακτοποίηση.
Diagram 2.15: Adhesive strength in function with temperature, softening.

Παρατηρούμε ότι η τελική αντοχή μιας συγκεκριμένης κόλλας δεν είναι εύκολο να προσδιορισθεί. Κάθε κόλλα έχει τη δική της συμπεριφορά στις διάφορες θερμοκρασιακές μεταβολές και για να προσδιοριστούν οι ιδιότητές της πρέπει να γίνονται ξεχωριστά πειράματα. Επίσης, δεν είναι εύκολο μια κόλλα να καλύπτει πλήρως τις ανάγκες μας. Για το λόγο αυτό συχνά στις κατασκευές χρησιμοποιούνται συνδυασμοί και μίγματα διάφορων κολλών, ώστε να συνδυάζονται τα πλεονεκτήματά τους και, όσο είναι δυνατό να αποφεύγονται τα μειονεκτήματα.

Μέτρο ελαστικότητας

Όπως είναι γνωστό, για τον προσδιορισμό και το χαρακτηρισμό ενός υλικού είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το μέτρο ελαστικότητάς του. Στα μεταλλικά στοιχεία ο προσδιορισμός της σχέσης τάσης - παραμόρφωσης είναι αρκετά απλός. Στις κόλλες όμως αυτό δεν είναι τόσο εύκολο, αφού, όπως είπαμε κάθε κόλλα έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και συνεπώς το δικό της διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης. Επίσης, τα μεταλλικά στοιχεία δεν επηρεάζονται τόσο από τις θερμοκρασιακές μεταβολές και το μέτρο ελαστικότητάς τους δεν αλλάζει. Στις κόλλες όμως η θερμοκρασία μπορεί να αλλάξει ριζικά τη σχέση τάσης - παραμόρφωσης και κατά συνέπεια και το μέτρο ελαστικότητας.

Οι μεταβολές του μέτρου ελαστικότητας συνδέονται άμεσα με το βαθμό δικτύωσης των πολυμερών, δηλαδή όσο πιο πυκνό είναι το δίκτυο τόσο πιο μικρό είναι το μέτρο ελαστικότητας. Επίσης ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας είναι το πάχος της συγκολλητικής στρώσης. Όσο πιο παχύ είναι το στρώμα αυτό υπάρχει μεγαλύτερη εγκάρσια συστολή και συνεπώς το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται. Επιπλέον εξαρτάται και από τις συνθήκες σκλήρυνσης της εκάστοτε κόλλας.

Τέλος, ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας είναι η αντοχή σε εφελκυσμό. Στα περισσότερα είδη κόλλας όσο αυξάνουμε την εφελκυστική δύναμη τόσο μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας. Από τις δοκιμές εφελκυσμού προκύπτει ο αριθμός Poisson (ν), βάσει του οποίου και σύμφωνα με τη Σχέση 2.2 μπορούμε να συνδέσουμε το μέτρο ελαστικότητας (E) με το μέτρο διάτμησης (G). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τύπος αυτός ισχύει για ισοτροπικά υλικά, όπως τα μεταλλικά, αλλά και στην περίπτωση μας δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2)$$

Συνοψίζοντας, όπως και για τις προηγούμενες ιδιότητες των κολλών, ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας δεν αποτελεί εύκολη διαδικασία. Συνεπώς, θα πρέπει όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αριθμητικά μοντέλα να επιβεβαιώνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Ερπυσμός

Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε στερεό σώμα, στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση, παρότι η τάση η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Σαν προσεγγιστικός κανόνας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πρώτη εκτίμηση της περιοχής ερπυσμού για πολλά υλικά, είναι το γεγονός ότι, όπως έχει παρατηρηθεί ο ερπυσμός συμβαίνει σε θερμοκρασίες πάνω από περίπου το 1/3 της θερμοκρασίας τήξης του υλικού.

Όπως λοιπόν συμβαίνει με όλα τα υλικά έτσι και οι κόλλες, αλλά και γενικά τα πολυμερή, παραμορφώνονται υπό σταθερή καταπόνηση. Με τη διαρκή, σταθερή αυτή καταπόνηση οδηγούμαστε σε χαλάρωση των διαμοριακών δεσμών και τελικά στη θραύση. Με άλλα λόγια, η σταθερή καταπόνηση μειώνει τις αντοχές των πολυμερών.

Οι πιο βασικές παράμετροι που φαίνεται να αλληλοεπιδρούν με τον ερπυσμό είναι η θερμοκρασία, η καταπόνηση του πολυμερούς, το είδος της κόλλας και οι ιδιότητες των στοιχείων που κολλιούνται.

Είναι ευνόητο ότι ένα υλικό που εμφανίζει σημαντικό ερπυσμό είναι ακατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται διαστατική σταθερότητα. Αλλά ακόμα και στις εφαρμογές όπου ο ερπυσμός είναι ανεκτός, είναι κατά κανόνα απαραίτητη η εκτίμησή του για την ορθολογική επιλογή και σχεδιασμό υλικών και διεργασιών.

Κρυσταλλικότητα

Η κρυσταλλικότητα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή των θερμοπλαστικών, κυρίως, πολυμερών. Με αύξηση της κρυσταλλικότητας ενός πολυμερούς αυξάνεται η αντοχή σε εφελκυσμό και κατά συνέπεια και το μέτρο ελαστικότητας και τελικώς αποτελεί πλεονέκτημα των πολυμερών.

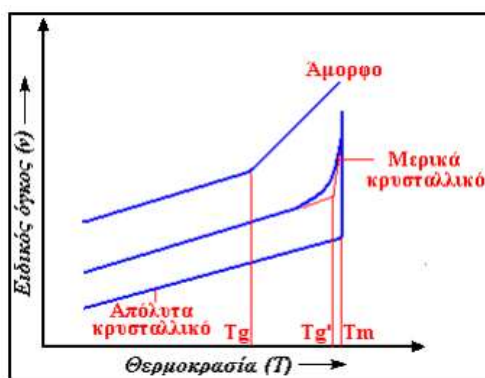
Η κρυσταλλικότητα ενός θερμοπλαστικού πολυμερούς επηρεάζεται από την ταχύτητα ψύξης του. Για παράδειγμα, μια αργή ψύξη δίνει έναν υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας. Γενικά, δεν επιθυμούμε κόλλες με μεγάλο βαθμό κρυσταλλικότητας καθώς δεν έχουν αρκετά υψηλές τιμές διεπιφανειακής τάσης.

Δεδομένου ότι στα κρυσταλλικά πολυμερή συνυπάρχουν κρυσταλλική και άμορφη περιοχή, υφίσταται επίσης η έννοια της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης T_g , η οποία επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Από το βαθμό κρυστάλλωσης: Αύξηση του βαθμού κρυστάλλωσης οδηγεί σε αύξηση της T_g
- Από την ευκαμψία της κύριας αλυσίδας: Αύξηση της ευκαμψίας της μακρομοριακής αλυσίδας οδηγεί σε μείωση της T_g .
- Από τις προστιθέμενες ομάδες/διακλαδώσεις (είδος και αριθμό) στη βασική αλυσίδα:

⇒ Η προσθήκη έστω και μικρής ομάδας στη βασική αλυσίδα αυξάνει την T_g

⇒ Αύξηση του μήκους πλευρικής διακλάδωσης οδηγεί σε μείωση της T_g .



Διάγραμμα 2.16: Επίδραση του βαθμού κρυστάλλωσης επί της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης

Diagram 2.16: Effect of the degree of crystallization on glass transition temperature.

Ομοιογένεια

Η ύπαρξη ομοιογένειας είναι αρκετά σημαντική, καθώς μπορεί να αποτρέψει προβλήματα που είναι δυνατόν να προκύψουν, όπως:

- *Περιοχές με μη ικανοποιητική σκλήρυνση:* κατά τη διαδικασία μίξης των συστατικών του πολυμερούς για το σχηματισμό μιας κόλλας μπορεί να υπάρχουν αβεβαιότητες ως προς την επιτυγχανόμενη ομοιογένεια. Είναι λοιπόν βασικό η διαδικασία μίξης να είναι αυτοματοποιημένη, ώστε όλα τα συστατικά να ενωθούν σωστά μεταξύ τους
- *Ρωγμές στο κολλητικό στρώμα:* οι ρωγμές προκαλούνται από την ύπαρξη εσωτερικών τάσεων. Πρέπει λοιπόν η σκλήρυνση της κόλλας να γίνεται ομοιόμορφα
- *Πόροι, ατέλειες:* προκαλούνται συνήθως από την παρουσία αέρα εντός του κολλητικού στρώματος με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του. Συμβαίνει συνήθως κατά τη διάρκεια της ανάμιξης και μπορεί να αποφευχθεί εάν η ανάμιξη πραγματοποιείται εντός αεροστεγούς χώρου.

2.2.5. Ιδιότητες των συγκολλήσεων με χρήση κόλλας

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για το εάν η χρήση κόλλας είναι καλύτερη από τη συμβατική συγκόλληση ή κοχλίωση πρέπει αρχικά να γνωρίζουμε τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα μιας συγκόλλησης με τη χρήση κόλλας. Οι παράμετροι που θα εξεταστούν είναι οι ακόλουθες:

- Ο σχεδιασμός της κατασκευής
- Η συμπεριφορά της κόλλας και ο τρόπος θραύσης της συγκόλλησης
- Η συμπεριφορά της κόλλας σε συνθήκες περιβάλλοντος
- Η κατανομή των τάσεων λόγω καταπόνησης και η αντοχή της συγκόλλησης
- Η παρουσία εσωτερικών τάσεων

Τα DIN 8580 και DIN 8593 περιγράφουν επακριβώς τη διαδικασία συγκόλλησης με χρήση κόλλας. Η διαδικασία που ακολουθείται σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία που αναμένεται να έχουμε σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου και με το εάν τα προς συγκόλληση υλικά είναι μεταλλικά ή όχι.

Επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της συγκόλλησης με κόλλα αναφέρονται παρακάτω και θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Πλεονεκτήματα:

- ✓ Ισοκατανομή των τάσεων κάθετα στην επιφάνεια φόρτισης
- ✓ Καμία θερμική μεταβολή της δομής τους
- ✓ Καμία θερμική παραμόρφωσή τους
- ✓ Δυνατότητα συγκόλλησης ποικίλων συνδυασμών στοιχείων
- ✓ Δυνατότητα συγκόλλησης ακόμα και λεπτών στοιχείων (π.χ. μεμβράνες)
- ✓ Χρήση στις ελαφρές κατασκευές
- ✓ Δυνατότητα συγκόλλησης θερμοευαίσθητων υλικών
- ✓ Δυνατότητα συγκόλλησης μετάλλων με διαφορετικές ηλεκτροχημικές ιδιότητες

- ✓ Αυξημένη αντοχή σε σχέση με κοχλιώσεις και συμβατικές συγκολλήσεις
- ✓ Υψηλή αντοχή σε δυναμικά φαινόμενα
- ✓ Δυνατότητα αυτοματοποίησης

Μειονεκτήματα:

- ✓ Απαίτηση χρόνου για την επίτευξη των επιθυμητών αντοχών
- ✓ Υποχρεωτική επεξεργασία των επιφανειών που συγκολλούνται
- ✓ Περιορισμένη διατήρηση των διαστάσεων σε θερμικές μεταβολές
- ✓ Προσεκτικός έλεγχος της διαδικασίας συγκόλλησης
- ✓ Επίδραση της γήρανσης στα συγκολλητικά στρώματα
- ✓ Δαπανηρός ο έλεγχος της συγκόλλησης
- ✓ Ερπυσμός
- ✓ Απαίτηση μεγάλων επιφανειών συγκόλλησης προς αντιστάθμιση των μικρών αντοχών των συγκολλητικών στρωμάτων
- ✓ Περιορισμένες δυνατότητες επιδιόρθωσης
- ✓ Χρονοβόρος ο υπολογισμός της αντοχής της συγκόλλησης
- ✓ Καταστροφή της σύνδεσης

Πλεονεκτήματα

- *Ισοκατανομή των τάσεων κάθετα στην επιφάνεια φόρτισης:* Συχνά μιλάμε για ισοκατανομή τάσεων εντός ενός συγκολλητικού στρώματος. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονίσουμε πως αυτή η ισοκατανομή ισχύει για τάσεις που είναι κάθετες στην επιφάνεια φόρτισης. Αυτό αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό πλεονέκτημα καθώς στις συμβατικές συγκολλήσεις δεν επικρατεί η επιθυμητή ομοιογένεια στο εσωτερικό τους και συνεπώς δεν υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή τάσεων. Με άλλα λόγια η ροή των τάσεων δεν παρουσιάζει έντονες αλλαγές, όπως στις κοχλιώσεις και στις συμβατικές συγκολλήσεις.
- *Καμία θερμική μεταβολή της δομής τους:* Αυτό το πλεονέκτημα μπορεί να συγκριθεί άμεσα με τις συμβατικές συγκολλήσεις. Για να πραγματοποιηθούν οι συμβατικές συγκολλήσεις προσδίδεται θερμότητα που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή των στοιχείων που ενώνονται και αλλάζει τη δομή τους. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που στην αεροναυπηγική οι κόλλες έχουν ευρεία εφαρμογή καθώς το αλουμίνιο υφίσταται σημαντικές αλλαγές όταν θερμαίνεται.
- *Καμία θερμική παραμόρφωση:* Όπως προαναφέραμε η χρήση κόλλας δεν απαιτεί θέρμανση. Κατά συνέπεια ούτε εισαγωγή τάσεων και τελικώς καμία παραμόρφωση.
- *Δυνατότητα συγκόλλησης ποικίλων συνδυασμών στοιχείων:* Για τη συγκόλληση ενός συνδυασμού μεταλλικών και μη μεταλλικών στοιχείων, φυσικών και συνθετικών, τα οποία έχουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά, η χρήση κόλλας αποτελεί τη μόνη δυνατότητα για τη δημιουργία ανθεκτικών

συνδέσεων. Σε αντίθεση με τις τυπικές συγκολλήσεις η αποτελεσματικότητα της κόλλας δεν επηρεάζεται από τα συγκολλούμενα στοιχεία.

- *Δυνατότητα συγκόλλησης ακόμα και λεπτών στοιχείων (π.χ. μεμβράνες):* Τα λεπτά στοιχεία όταν θερμαίνονται υφίστανται σημαντικές παραμορφώσεις. Για αυτό το λόγο οι κόλλες χρησιμοποιούνται σε μεμβράνες, λεπτά μέταλλα ακόμα και χαρτιά. Αυτό το πλεονέκτημα αξιοποιείται κυρίως στις ελαφρές μεταλλικές κατασκευές.
- *Χρήση στις ελαφρές κατασκευές:* Σε πολλές εφαρμογές βασικός στόχος είναι η επίτευξη ελαφρών κατασκευών με την επιθυμητή όμως αντοχή. Οι κόλλες μπορούν να διατηρήσουν τις αντοχές και τη δυσκαμψία που επιθυμούμε χωρίς να προσθέτουν βάρος στην κατασκευή μας, όπως π.χ. οι πολλές κοχλιώσεις.
- *Δυνατότητα συγκόλλησης θερμοευαίσθητων υλικών:* Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε εφαρμογές που αφορούν την ηλεκτρολογία.
- *Δυνατότητα συγκόλλησης μετάλλων με διαφορετικές ηλεκτροχημικές ιδιότητες:* Η τυπική συγκόλληση αποτελεί εν μέρει εισαγωγή ηλεκτρολυτών στα στοιχεία που ενώνει και υπάρχει πιθανότητα να αλλάξουν οι φυσικές τους ιδιότητες. Με τη χρήση κόλλας δεν πραγματοποιείται εισαγωγή ηλεκτρολυτών, καθώς η επαφή των δύο στοιχείων είναι άμεση.
- *Αυξημένη αντοχή σε σχέση με κοχλιώσεις και συμβατικές συγκολλήσεις:* η χρήση κόλλας αυξάνει την αντοχή της εκάστοτε σύνδεσης, λόγω δυνατότητας αύξησης του πάχους του κολλητικού στρώματος. Επίσης δεν εμφανίζονται φαινόμενα διάβρωσης όπως π.χ. στις κοχλιώσεις, τα οποία μειώνουν την αντοχή.
- *Υψηλή αντοχή σε δυναμικά φαινόμενα:* Οι μηχανικές ιδιότητες των κολλών επιτρέπουν ελαστικές παραμορφώσεις κάτω από εναλλασσόμενη φόρτιση, χωρίς τη μεταβολή της αντοχής τους. Ακόμα σε περιπτώσεις ταλάντωσης το κολλητικό στρώμα λειτουργεί σαν αποσβεστήρας.
- *Δυνατότητα αυτοματοποίησης:* Η εφαρμογή της κόλλας είναι εύκολο, σε πολλές περιπτώσεις να αυτοματοποιηθεί με χρήση ρομπότ.

Μειονεκτήματα

- *Απαίτηση χρόνου για την επίτευξη των επιθυμητών αντοχών:* Σε αντίθεση με τις συμβατικές συγκολλήσεις ο παράγοντας χρόνος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή των συγκολλήσεων με κόλλα. Για τη σκλήρυνση του κολλητικού στρώματος και τη διαμόρφωση των τελικών του ιδιοτήτων πρέπει να περάσει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο εξαρτάται από τις αντιδράσεις των μονομερών αλλά και τη θερμοκρασία. Για αυτό το λόγο οφείλουμε να

είμαστε προσεκτικοί καθώς η συγκόλληση δεν θα πάρει ευθύς εξαρχής τις τελικές της αντοχές.

- *Υποχρεωτική επεξεργασία των επιφανειών που συγκολλούνται:* Όταν η σύνδεση απαιτεί υψηλές αντοχές, αλλά και γενικότερα, θα πρέπει να γίνεται επιμελής επεξεργασία των επιφανειών που συγκολλούνται, καθώς σε περίπτωση που υπάρχουν ατέλειες μπορεί να οδηγηθούμε σε καταστροφή της συγκόλλησης.
- *Περιορισμένη διατήρηση των διαστάσεων σε θερμικές μεταβολές:* Σε υψηλές θερμοκρασίες η ποιότητα της συγκόλλησης με πολυμερή οργανικής βάσης είναι κατώτερη από αυτή της συμβατικής συγκόλλησης. Για αυτό το λόγο πρέπει να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία στη φάση λειτουργίας της συγκόλλησης, ώστε να επιλέξουμε την ορθότερη λύση.
- *Προσεκτικός έλεγχος της διαδικασίας συγκόλλησης:* Κατά τη διαδικασία συγκόλλησης με κόλλα πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα και να πραγματοποιούνται διαρκείς έλεγχοι. Οι έλεγχοι αυτοί αφορούν τις επιφάνειες που συγκολλούνται, τον τρόπο σκλήρυνσης της κόλλας, το μίγμα που χρησιμοποιείται κ.ο.κ.
- *Γήρανση των συγκολλητικών στρωμάτων:* Η επίδραση της γήρανσης στα συγκολλητικά στρώματα εξαρτάται από τη χημική δομή τους και από το βαθμό δικτύωσης. Επίσης, η γήρανση μπορεί να επηρεάσει και τη σχέση μεταξύ της κόλλας και των στοιχείων που ενώνει και να μειώσει τις αντοχές της σύνδεσης.
- *Δαπανηρός έλεγχος της συγκόλλησης:* Για τις συγκολλήσεις με χρήση κόλλας απαιτούνται ακριβείς έλεγχοι ποιότητας των υλικών και των συνθηκών που θα επικρατούν στη φάση της λειτουργίας του. Οι έλεγχοι αυτοί μας επιτρέπουν να γνωρίζουμε τις πιθανότητες εμφάνισης πόρων και ρωγμών και δεν γίνεται να παραλειφθούν. Κάτι τέτοιο δεν απαιτείται στις συμβατικές συγκολλήσεις καθώς οι ιδιότητες τους είναι ήδη γνωστές.
- *Ερπυσμός:* Το φαινόμενο αυτό είναι δυνατό να αποφευχθεί με τη χρήση κατάλληλων μέτρων.
- *Απαίτηση μεγάλων επιφανειών συγκόλλησης προς αντιστάθμιση των μικρών αντοχών των συγκολλητικών στρωμάτων:* Σε σχέση με τις τυπικές συγκολλήσεις οι κόλλες έχουν χαμηλότερες αντοχές. Και αυτό όμως το μειονέκτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με επιλογή μεγαλύτερων επιφανειών συγκόλλησης ή/και προσθήκη κατάλληλων πρόσθετων υλικών.
- *Περιορισμένες δυνατότητες επιδιόρθωσης:* Όπως προαναφέρθηκε για τη συγκόλληση με κόλλα απαιτείται η τήρηση συγκεκριμένων διαδικασιών. Συνεπώς, σε περίπτωση που αστοχήσει ένα σημείο της συγκόλλησης, η επιδιόρθωσή του στον επιθυμητό βαθμό δεν είναι πάντα εφικτή και ενδέχεται να απαιτηθεί εκ νέου συγκόλληση.

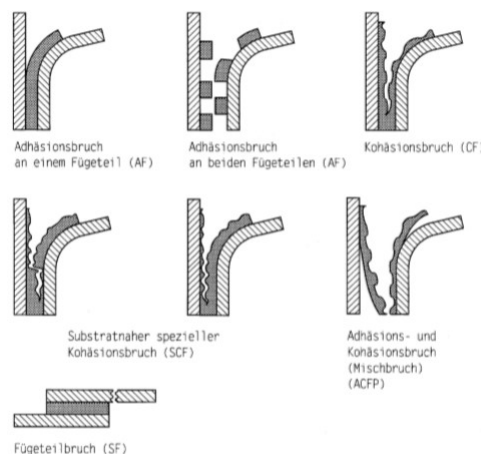
- Χρονοβόρος και απαιτητικός ο υπολογισμός της αντοχής της συγκόλλησης.
- Πιθανότητα καταστροφής της σύνδεσης: Ένα βασικό πλεονέκτημα των συγκολλήσεων με κόλλα είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ένωση ανόμοιων υλικών. Αυτό το πλεονέκτημα μπορεί όμως να αποβεί μειονέκτημα καθώς δε γνωρίζουμε πάντα τη συμπεριφορά των υλικών που ενώνουμε.

Συμπερασματικά, κάθε φορά που καλούμαστε να επιλέξουμε το κατάλληλο είδος συγκόλλησης, πρέπει να πραγματοποιούμε εκτενή διερεύνηση/έλεγχο και σταθμίζοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα να καταλήγουμε στην ορθότερη λύση. Σε αυτή την απόφαση δεν πρέπει να ξεχνάμε και τον οικονομικό παράγοντα, που πάντα υπεισέρχεται στα έργα πολιτικού μηχανικού.

2.2.6. Συμπεριφορά των συγκολλητικών ουσιών σε θραύση

Υπάρχουν πολλά είδη θραύσης και αποκόλλησης που περιγράφονται στο DIN EN ISO 10365. Σε αυτό το πρότυπο περιγράφονται επιπλέον και οι λόγοι που οδήγησαν στη θραύση, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι των στοιχείων που ενώνονται αλλά και του είδους της κόλλας. Υπάρχουν δύο κατηγορίες θραύσης:

- Αστοχία λόγω ασθενούς οριακού στρώματος (Adhäsionsbruch).
- Ψαθυρή αστοχία (Kohäsionsbruch).



Εικόνα 2.4: Είδη Θραύσης
Figure 2.4: Fracture types

Αστοχία λόγω ασθενούς οριακού στρώματος

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η θραύση πραγματοποιείται λόγω της ανεπαρκούς επεξεργασίας των υλικών που ενώνονται. Στη βιβλιογραφία είναι γνωστή και ως weak boundary layer. Άλλες αιτίες που οδηγούν σε αυτού του είδους τη θραύση είναι:

- Ανομοιογένειες στη δομή του πολυμερούς, λόγω χημικών αντιδράσεων των συγκολλητικών μορίων με στρώματα οξειδίου ή/και υδροξειδίου της μεταλλικής επιφάνειας.
- Πιθανή εισροή αέρα εντός του κολλητικού στρώματος.
- Διαφορετική δομή του πολυμερούς στην περιοχή του οριακού στρώματος σε σχέση με τη δομή στο εσωτερικό του συγκολλητικού στρώματος.
- Μειωμένη ικανότητα διασύνδεσης των μορίων στο εσωτερικό του συγκολλητικού στρώματος, εξαιτίας της μειωμένης διαθεσιμότητας αντιδρώντων ομάδων, λόγω προσρόφησης χημικών στο οριακό στρώμα, που οφείλεται στις αρχικές αντιδράσεις των μορίων με τη μεταλλική επιφάνεια,

Ψαθυρή αστοχία

Η θραύση μίας συγκόλλησης εξαρτάται από το είδος της καταπόνησης και από την ύπαρξη ή μη εσωτερικών τάσεων. Το είδος θραύσης που εξαρτάται από την καταπόνηση καλείται ψαθυρή αστοχία.

Τέτοια αστοχία συμβαίνει συνήθως σε πολυμερή με αρκετά μεγάλο βαθμό δικτύωσης, τα οποία δεν είναι ικανά να ανακτήσουν τις αντοχές τους μετά τη θραύση. Η ψαθυρότητα ενός πολυμερούς αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας και είναι συνέπεια της αύξησης του μέτρου ελαστικότητας.

Η ψαθυρότητα εξαρτάται από τις συνθήκες καταπόνησης της σύνδεσης, οι οποίες επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα φόρτισης και τις αναπτυσσόμενες τάσεις. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με πιθανές ανομοιογένειες θα οδηγήσουν στη τελική μορφή της αστοχίας, η οποία δεν είναι δυνατόν προς το παρόν να προληφθεί πλήρως.

2.2.7. Αντοχές των συγκολλήσεων σε μεταλλικές κατασκευές

Η κλασική θεώρηση για τον προσδιορισμό των μηχανικών αντοχών ενός υλικού και ο προσδιορισμός του σημείου θραύσης εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης. Αυτό ισχύει όμως στα ομογενή υλικά. Η ιδιαιτερότητα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι στις μεταλλικές κολλήσεις δεν έχουμε να κάνουμε με ομογενή υλικά αλλά με ενώσεις αυτών. Συνεπώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί οι αντοχές μιας τέτοιας συγκόλλησης εξαρτώνται από τα υλικά τα οποία συνδέει, από το κολλητικό στρώμα και από την οριακή επιφάνεια επαφής μεταξύ κολλητικού στρώματος και μετάλλου. Για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τις αντοχές με τις συμβατικές μεθόδους, δεδομένου ότι για διαφορετική γεωμετρία και υλικά οι συνθήκες φόρτισης είναι διαφορετικές.

Αρκετά σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή των μεταλλικών συγκολλήσεων είναι η ανισοκατανομή των τάσεων για μια δεδομένη φόρτιση. Για το λόγο αυτό αναλόγως την κόλλα που χρησιμοποιείται η συγκόλληση αποκτά διαφορετικές ιδιότητες. Συνεπώς, δεν μπορούμε να εξάγουμε γενικά συμπεράσματα για τις μεταλλικές συγκολλήσεις.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των μεταλλικών συγκολλήσεων είναι:

- *Εξάρτηση της κατανομής των τάσεων από τη θερμοκρασία*

- *Πάχος κολλητικού στρώματος*
- *Το υλικό της κόλλας:* Η χημική δομή της κόλλας και ο τρόπος με τον οποίο έγινε η σκλήρυνσή της διαμορφώνουν τις αντοχές αλλά και τις ιδιότητές της, οι οποίες εξαρτώνται, όπως προαναφέρθηκε από τις αντιδράσεις των μονομερών που την αποτελούν.
- *Τα υλικά που ενώνονται:* Βασικό χαρακτηριστικό των υλικών αυτών είναι το μέτρο ελαστικότητάς τους αλλά και η σχέση τάσης - παραμόρφωσης.
- *Η γεωμετρική διαμόρφωση της συγκόλλησης,* δηλαδή πως είναι τοποθετημένα τα μεταλλικά στοιχεία σε σχέση με τη κόλλα.
- *Οι συνθήκες καταπόνησης:* Αυτές διακρίνονται σε φυσικές, μηχανικές και χημικές συνθήκες καθώς και στο συνδυασμό αυτών.

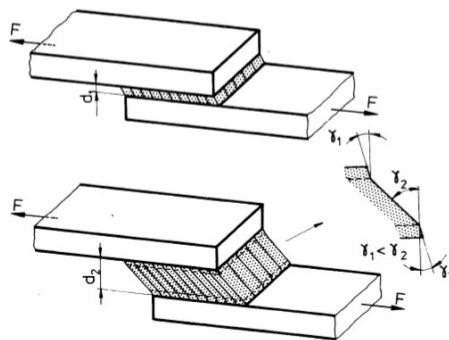
Οι αντοχές μιας μεταλλικής συγκόλλησης προκύπτουν ως συνδυασμός των παραπάνω. Η συνεκτίμηση αυτών των παραμέτρων ουσιαστικά οδηγεί στην ορθότερη επιλογή κόλλας. Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν οι δύο πρώτοι παράγοντες, οι οποίοι λήφθηκαν κατά κύριο λόγο υπόψη κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Εξάρτηση της κατανομής των τάσεων από τη θερμοκρασία

Όπως και οι μηχανικές ιδιότητες της κόλλας έτσι και η κατανομή των τάσεων εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται ως εξής: Με αύξηση της θερμοκρασίας το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται σύμφωνα με το νόμο του Hooke, που όπως έχουμε αναφέρει ισχύει, με αρκετά καλή προσέγγιση, και στην περίπτωση των κολλών. Με άλλα λόγια αφού το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται, μειώνεται και η παραμόρφωση, ενώ αυξάνεται η τάση. Δηλαδή, υπάρχει αύξηση της αντοχής της κόλλας. Η αύξηση της αντοχής σταματάει όταν έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ της τάσης και του μέτρου ελαστικότητας.

Πάχος κολλητικού στρώματος

Το πάχος του κολλητικού στρώματος δεν είναι ένα καθαρά γεωμετρικό μέγεθος, αφού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό και την αντοχή της. Για παράδειγμα, τα διαφορετικά πάχη δίνουν, ανάλογα την ολίσθηση μεταξύ των συγκολλούμενων στοιχείων, διαφορετικές παραμορφώσεις και κατά συνέπεια διαφορετικές αντοχές.

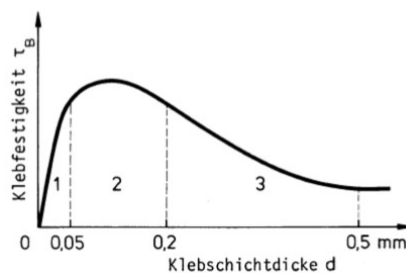


Εικόνα 2.5: Επίδραση πάχους κολλητικού στρώματος.
Figure 2.5: Effect of adhesive layer thickness

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζονται από το πάχος της συγκολλητικής στρώσης είναι:

- Η αναλογία των περιοχών, όπου οι δυνάμεις πρόσφυσης και συνοχής είναι αποτελεσματικές. Σε μικρότερα πάχη στρώματος συγκολλητικής ουσίας εμποδίζεται η εγκάρσια συστολή του συγκολλητικού στρώματος. Αυτή η παρεμπόδιση εγκάρσιας συστολής, που συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής μειώνεται με το αυξανόμενο πάχος της κολλητικής στρώσης. Όταν στον όγκο ενός κολλητικού στρώματος ασκηθεί μια δύναμη κατά τη διεύθυνση $x'x$ τότε στις διευθύνσεις $y'y$ και $z'z$ προκαλείται μια συστολή, η οποία όμως περιορίζεται από τις δυνάμεις πρόσφυσης που δημιουργούνται στο κολλητικό στρώμα.
- Συμπληρωματικά με την παραπάνω μακροσκοπική παρατήρηση στη νανοκλίμακα δημιουργούνται, λόγω του πάχους ικανότητες παραμόρφωσης, που συνεισφέρουν στις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης.
- Η σχέση του πάχους της κολλητικής στρώσης με τη γεωμετρική δομή/τραχύτητα της επιφάνειας. Προκειμένου να αποφευχθεί η επαφή των δύο στοιχείων που συγκολλούνται, απαιτείται συνεκτίμηση των δύο αυτών παραγόντων.
- Σε μεγάλα πάχη υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης ανομοιογενειών.
- Όσο αυξάνεται το πάχος του στρώματος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης εκκεντροτήτων και ανεπιθύμητης ροπής, η οποία μπορεί να εισάγει τάσεις που θα επιβαρύνουν τη σύνδεση.
- Τέλος, η ανομοιομορφία στο πάχος της συγκόλλησης μπορεί επίσης να προκαλέσει προβλήματα. Αυτό μπορεί να συμβεί αν τα στοιχεία δεν τοποθετηθούν ακριβώς παράλληλα και δεν κολληθούν στο σωστό σημείο.

Η σχέση αντοχής συγκόλλησης - πάχους κολλητικής στρώσης φαίνεται στο Διάγραμμα 2.17:



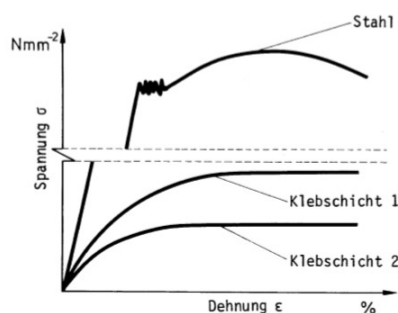
Διάγραμμα 2.17: Σχέση πάχους στρώσης – αντοχής συγκόλλησης
Diagram 2.17: Layer thickness - weld resistance

- Στο πρώτο τμήμα (0.00-0.05 mm) παρατηρείται αύξηση της αντοχής της κόλλας, σε περιοχές δηλαδή μικρού πάχους. Προϋπόθεση για να επιτευχθεί/συγκόλληση σε τόσο μικρά πάχη είναι η κόλλα να έχει χαμηλό ιξώδες ($200 < \eta < 1000$ mPas).
- Στο δεύτερο τμήμα (0.05-0.20 mm) μεγιστοποιούνται οι αντοχές της κόλλας, κάτι που επιβεβαιώνεται και πειραματικά.
- Στο τρίτο και τελευταίο τμήμα (0.20-0.50 mm) μειώνεται η αντοχή μέχρι το μηδενισμό της. Αυτό συμβαίνει κατά κύριο λόγο επειδή, όπως αναφέραμε και

παραπάνω η εγκάρσια παραμόρφωση δεν εμποδίζεται στα πολύ παχιά στρώματα

Σχέση αντοχής - παραμόρφωσης

Βασικό χαρακτηριστικό της σχέσης αυτής είναι το γεγονός ότι όταν μια κόλλα πλησιάσει μια συγκεκριμένη τιμή τάσης σταματάει να αυξάνεται η αντοχή της ενώ μπορεί να φτάσει σε μεγάλες τιμές παραμόρφωσης. Η συμπεριφορά αυτή διαφέρει από αυτή του χάλυβα, καθώς η αντοχή του αυξάνεται σημαντικά μέχρι το σημείο θραύσης του (Διάγραμμα 2.18).



Διάγραμμα 2.18: Σχέση τάσης - παραμόρφωσης για χάλυβα και για δύο συγκολλητικά στρώματα

Diagram 2.18: Stress - strain relation for steel and two adhesive layers

Τελικώς συμπεραίνουμε ότι η συνολική αντοχή ενός κολλητικού στρώματος εξαρτάται όχι μόνο από την οριακή τιμή της αντοχής του αλλά και από την παραμόρφωσή του. Συνεπώς είναι λάθος να επιλέγουμε κολλητικές ουσίες με μοναδικό κριτήριο τη μέγιστη τάση που μπορούν να αναλάβουν. Μια σωστή θεώρηση για την επιλογή της καταλληλότερης κόλλας δίνεται από το DIN 53283.

2.2.8. Τάσεις στις μεταλλικές συγκολλήσεις με λεπτό, παραμορφώσιμο κολλητικό στρώμα

Το καθοριστικό κριτήριο για τον προσδιορισμό της αντοχής μιας μεταλλικής συγκόλλησης είναι οι τάσεις που εμφανίζονται στην κάθε σύνδεση. Αυτές οι τάσεις χωρίζονται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

- Ορθές εφελκυστικές τάσεις
- Ορθές τάσεις λόγω ροπής
- Ορθές τάσεις λόγω έκκεντρης αξονικής δύναμης
- Διατμητικές τάσεις
- Συνδυασμός διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων

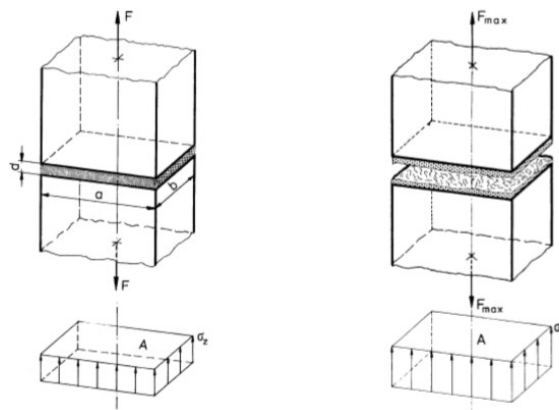
Οι πρώτες τέσσερις περιπτώσεις ουσιαστικά αποτελούν εξαίρεση. Συνήθως στη πράξη εμφανίζονται διάφορες εκκεντρότητες που μας οδηγούν στην πέμπτη κατηγορία τάσεων, δηλαδή στην ύπαρξη ροπής. Όμως για λόγους πληρότητας αλλά και καλύτερης κατανόησης του φαινομένου θα μελετήσουμε και τις πρώτες τέσσερις.

Ορθές εφελκυστικές τάσεις

Δυο μεταλλικά στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα. Εάν σε αυτή τη διάταξη εφαρμόσουμε μια κεντρική εφελκυστική δύναμη χωρίς εκκεντρότητες, τότε στο κολλητικό στρώμα θα έχουμε ορθή τάση. Η τιμή της ως γνωστόν θα είναι το πηλίκο της εφαρμοζόμενης δύναμης (F) προς την κολλητική επιφάνεια (A), δηλαδή θα είναι $\sigma_z = \frac{F}{A}$. Με αύξηση της καταπόνησης θα επέλθει η θραύση του κολλητικού στρώματος, μόλις αυτή φτάσει στη μέγιστη επιτρεπόμενη δύναμη F_{\max} .

Είναι προφανές ότι η θραύση λόγω εφελκυσμού θα επέλθει πρώτα στο κολλητικό στρώμα, αφού όπως αναφέραμε οι αντοχές των μεταλλικών στοιχείων είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές της κόλλας. Πιο συγκεκριμένα αναλόγως τις ιδιότητες της εκάστοτε κόλλας η εφελκυστική αντοχή της είναι περίπου 40-80 MPa, δηλαδή περίπου το 10% αυτής των μεταλλικών στοιχείων.

Αφού η φόρτιση είναι ορθή και σταθερή, η κατανομή των τάσεων είναι επίσης σταθερή. Αυτό ουσιαστικά αυξάνει τις αντοχές της κόλλας έως και τέσσερις φορές παραπάνω από την πιο ρεαλιστική προσέγγιση της μη ορθής κατακόρυφης τάσης. Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής ενός κολλητικού στρώματος ακολουθούνται οι διαδικασίες που περιγράφονται στο DIN 53288.

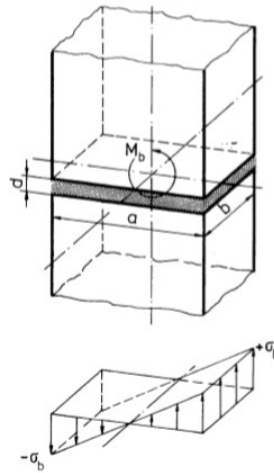


Διάγραμμα 2.19: Κατανομή ορθών τάσεων λόγω εφαρμοζόμενης κεντρικής δύναμης

Diagram 2.19: Distribution of stress due to applied central force

Ορθές τάσεις λόγω ροπής

Εάν στην παραπάνω δοκιμή αντί για δύναμη εφαρμοστεί κεντρικά ροπή τότε οι ορθές τάσεις στο κολλητικό στρώμα θα είναι $\sigma_b = \frac{M}{W}$, όπου W είναι η στατική ροπή αδράνειας της εκάστοτε διατομής.

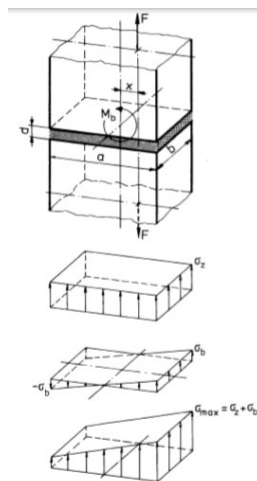


Διάγραμμα 2.20: Κατανομή ορθών τάσεων λόγω ροπής
Diagram 2.20: Distribution of stress due to moment

Ορθές τάσεις λόγω έκκεντρης αξονικής δύναμης

Τέλος, η πιο γενική περίπτωση ορθών τάσεων είναι ο συνδυασμός των παραπάνω περιπτώσεων με την εφαρμογή δύναμης έκκεντρα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ροπή είναι $M_b = Fx$, όπου x η απόσταση του σημείου εφαρμογής της δύναμης F από το κέντρο βάρους του κολλητικού στρώματος. Τελικώς η τάση υπολογίζεται με βάση τη σχέση 2.3.

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A} + \frac{M}{W} \quad (2.3)$$

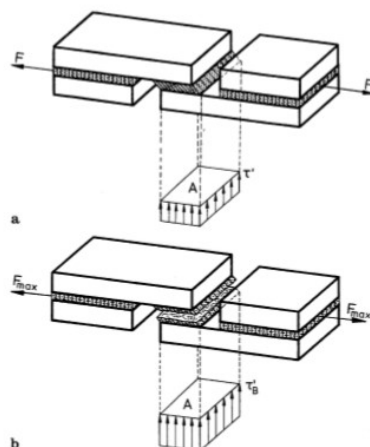


Διάγραμμα 2.21: Κατανομή ορθών τάσεων λόγω συγκεντρωμένης ροπής και δύναμης
Diagram 2.21: Distribution of stress due to concentrated moment and force

Διατμητική τάση

Όταν οι δυνάμεις ασκούνται παράλληλα με το κολλητικό στρώμα τότε δημιουργούνται διατμητικές τάσεις. Όπως λοιπόν και οι εφελκυστικές τάσεις έτσι και

οι διατμητικές εξαρτώνται από την ασκούμενη δύναμη και από την κολλητική επιφάνεια.



Διάγραμμα 2.22: Κατανομή διατμητικών τάσεων
Diagram 2.22: Shear stress distribution

Συνεπώς, η διατμητική τάση είναι $\tau = \frac{F}{A}$. Με την ίδια λογική που προέκυψε η μέγιστη εφελκυστική αντοχή προκύπτει και η μέγιστη διατμητική αντοχή, δηλαδή μέχρι το σημείο θραύσης. Ο υπολογισμός της μέγιστης διατμητικής αντοχής καθώς και η σχέση διατμητικής τάσης - διατμητικής παραμόρφωσης, περιγράφεται στο DIN 54451.

Συνδυασμός διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων

Η αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση που αναπτύχθηκαν παραπάνω αποτελούν στην πραγματικότητα ένα πολύ μικρό μέρος των εφαρμογών. Αυτό συμβαίνει για δύο βασικούς λόγους:

- Σε μια εφελκυστική φόρτιση τα στοιχεία που ενώνει η κόλλα δεν συμμετέχουν παρά ελάχιστα στην παραλαβή αυτής της φόρτισης και αυτό μόνο στην περίπτωση κεντρικού εφελκυσμού. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις τη φόρτιση στην ένωση την παίρνει η κόλλα και συνεπώς η αντοχή της ένωσης είναι μικρότερη.
- Στην πράξη για τη συγκόλληση με κόλλα δεν αρκεί απλά η επεξεργασία των προς συγκόλληση επιφανειών και η εφαρμογή της κόλλας. Για την καλύτερη ένωση δημιουργούνται διάφορες τομές που επηρεάζουν την κατανομή των τάσεων, προκαλώντας αρκετά περίπλοκες ροές τάσεων.

2.2.9. Γενικά συμπεράσματα

Από την ανάλυση που προηγήθηκε είναι σαφές ότι οι αντοχές μιας συγκόλλησης με χρήση κόλλας εξαρτώνται άμεσα από τη διαδικασία εφαρμογής της και τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης που θα επικρατήσουν. Για το λόγο αυτό δεν μπορούμε να βασιστούμε εξ ολοκλήρου στις αντοχές που προκύπτουν από τη διενέργεια του πειράματος, σύντομης χρονικής διάρκειας, που παρουσιάζεται στο DIN 53283. Αυτό θα πρέπει να συμπληρωθεί με πειράματα στις πραγματικές συνθήκες που αναμένεται να επικρατήσουν κατά την πραγματική λειτουργία της κατασκευής.

Παρόλο που απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση τους, οι κόλλες προσαρμόζονται με μεγάλη ευκολία στις απαιτήσεις ενός έργου, εφόσον έχουν επιλεγεί σωστά. Με τη χρήση των κατάλληλων βασικών μονομερών είναι δυνατόν να διαμορφώνουμε τις ιδιότητες της κόλλας και να πετυχαίνουμε το επιθυμητό για κάθε εφαρμογή αποτέλεσμα.

2.3. Αρχή της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας

Η αρχή της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας είναι μια έννοια στη φυσική των πολυμερών και στη φυσική των υγρών που υαλοποιούνται. Η αρχή της υπέρθεσης χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία μηχανικών ιδιοτήτων των γραμμικών ιξωδοελαστικών υλικών από γνωστές αντίστοιχες ιδιότητες σε μία θερμοκρασία αναφοράς. Το μέτρο ελαστικότητας των τυπικών άμορφων πολυμερών αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης αλλά μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έχει παρατηρηθεί ότι οι καμπύλες των στιγμιαίων μετρήσεων σε συνάρτηση με το χρόνο, δεν αλλάζουν μορφή με την αλλαγή της θερμοκρασίας, παρά μόνο μετατοπίζονται αριστερά ή δεξιά. Αυτό σημαίνει ότι μια ισόθερμη καμπύλη σε μια δεδομένη θερμοκρασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για την πρόβλεψη αντίστοιχων καμπυλών σε διάφορες θερμοκρασίες με την εφαρμογή μιας μετατόπισης. Η αρχή υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας βασίζεται στην παραπάνω παρατήρηση.

Η εφαρμογή της αρχής της υπέρθεσης συνήθως περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Πειραματικό προσδιορισμό των καμπυλών των ισοθερμικών ιξωδοελαστικών μηχανικών ιδιοτήτων που εξαρτώνται από τη συχνότητα φόρτισης σε διάφορες θερμοκρασίες και για ένα μικρό εύρος συχνοτήτων.
- Υπολογισμό ενός συντελεστή μετατόπισης για συσχέτιση αυτών των ιδιοτήτων με τη θερμοκρασία και το εύρος συχνοτήτων.
- Πειραματικό προσδιορισμό καμπύλης αναφοράς που παρουσιάζει την επίδραση της συχνότητας φόρτισης για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.
- Εφαρμογή του συντελεστή μετατόπισης για τον προσδιορισμό των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία ιδιοτήτων σε όλο το εύρος συχνοτήτων της καμπύλης αναφοράς.

Στην παρούσα εργασία οι ιδιότητες της υπό εξέταση κόλλας μελετήθηκαν για ένα εύρος ταχυτήτων φόρτισης/εφελκυσμού, και όχι για ένα εύρος συχνοτήτων, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει τη δυνατότητα εφαρμογής της αρχής της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας.

Ο συντελεστής μετατόπισης υπολογίζεται συχνά από την εμπειρική σχέση των Malcolm L. Williams, Robert F. Landel και John D. Ferry (ονομάζεται επίσης μοντέλο Williams-Landel-Ferry ή WLF). Χρησιμοποιείται επίσης ένα εναλλακτικό μοντέλο που προτείνεται από τον Arrhenius. Το μοντέλο WLF σχετίζεται με τη μακροσκοπική κίνηση του υλικού, ενώ το μοντέλο Arrhenius βασίζεται στην κίνηση των πολυμερικών αλυσίδων.

Στην πράξη το πλήθος των μετρήσεων στο εργαστήριο καθώς επίσης και τα χρονικά περιθώρια είναι περιορισμένα. Όμως με την εφαρμογή της αρχής της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας μπορούμε να περιορίσουμε το πλήθος των απαιτούμενων δοκιμών. Στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν πειραματικά, για διαφορετικές θερμοκρασίες και ταχύτητες φόρτισης, χαρακτηριστικές τιμές τάσης φόρτισης, οι οποίες μετατοπίζονται, σύμφωνα με το συντελεστή μετατόπισης a_T πάνω στο λογαριθμικό άξονα ταχυτήτων και δημιουργούν την καμπύλη αναφοράς. Ο συντελεστής μετατόπισης υπολογίζεται από τη σχέση των Williams-Landel-Ferry:

$$-\log(a_T) = \frac{c_1(T-T_{ref})}{c_2+(T-T_{ref})} \quad (2.4)$$

Στην παραπάνω σχέση εμφανίζονται οι συντελεστές C_1 και C_2 , οι οποίοι εξαρτώνται από τη θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} . Η θερμοκρασία αναφοράς είναι η θερμοκρασία της οποίας η ισόθερμη καμπύλη τάσης - ταχύτητας φόρτισης θα διατηρηθεί σταθερή ενώ οι υπόλοιπες θα μετακινηθούν αναλόγως δεξιά ή αριστερά πάνω στο λογαριθμικό άξονα της ταχύτητας.

Ο συντελεστής a_T ονομάζεται συντελεστής μετατόπισης ή συντελεστής οριζόντιας μετατόπισης, για τον οποίο ισχύουν:

$$T > T_{ref} \rightarrow a_T < 1$$

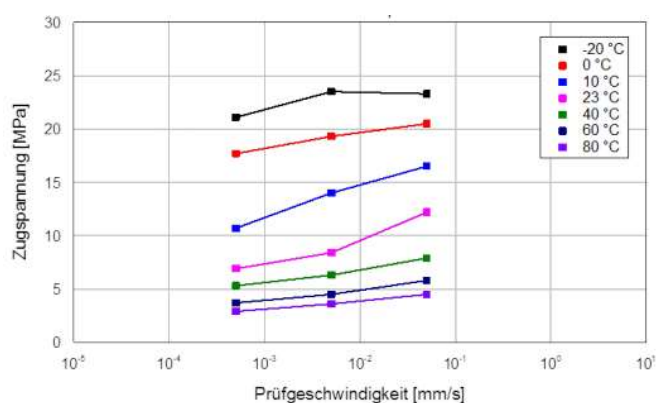
$$T < T_{ref} \rightarrow a_T > 1$$

$$T = T_{ref} \rightarrow a_T = 1$$

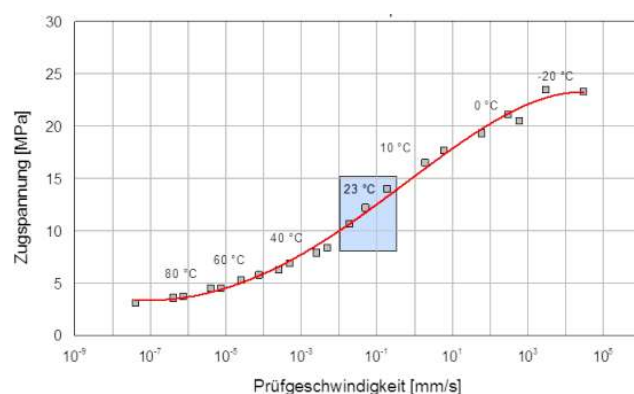
2.3.1. Κατασκευή καμπύλων αναφοράς

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3, οι καμπύλες αναφοράς ιξωδοελαστικών χαρακτηριστικών, όταν αλλάζει η θερμοκρασία μετατοπίζονται παράλληλα στο λογαριθμικό άξονα της ταχύτητας, αλλά το σχήμα τους δεν μεταβάλλεται.

Γενικώς, προϋπόθεση για την εφαρμογή της αρχής της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας είναι η ύπαρξη μιας ικανοποιητικής αλληλουχίας μεταξύ του τελικού και του αρχικού σημείου των μετακινούμενων ισόθερμων καμπύλων. Αυτό μπορεί να συμβεί με τη χρήση συντελεστών μετατόπισης, οι οποίοι θα οδηγήσουν σε μια ομαλή καμπύλη αναφοράς.



Διάγραμμα 2.23: Ισόθερμες καμπύλες
Diagram 2.23: Isothermal curves



Διάγραμμα 2.24: Καμπύλη αναφοράς βασισμένη στις παραπάνω ισόθερμες
Diagram 2.24: Master curve based on the above isotherms

Για την κατασκευή της καμπύλης αυτής απαιτείται ο καθορισμός μιας σταθερής θερμοκρασίας, της θερμοκρασίας αναφοράς. Συνήθως επιλέγεται ως θερμοκρασία αναφοράς η θερμοκρασία δωματίου. Έπειτα οι ισόθερμες καμπύλες που βρίσκονται κάτω από τη θερμοκρασία αναφοράς μετατοπίζονται προς τα δεξιά, δηλαδή σε υψηλότερες ταχύτητες φόρτισης, ενώ αυτές που βρίσκονται πιο ψηλά από τη θερμοκρασία αναφοράς μετατοπίζονται αριστερά, σύμφωνα με τη Σχέση 2.4. Συνοψίζοντας, σε χαμηλές θερμοκρασίες οι αντοχές παίρνουν τιμές αντίστοιχες με

αυτές σε υψηλές ταχύτητες φόρτισης, ενώ αντίστροφα σε υψηλές θερμοκρασίες οι αντοχές παίρνουν τιμές αντίστοιχες με αυτές σε χαμηλές ταχύτητες φόρτισης. Κατά αυτό το τρόπο καθίσταται εύκολο να υπολογίσουμε αντοχές σε ταχύτητες φόρτισης που πειραματικά είναι ανέφικτο να επιτευχθούν.

Περιορισμοί στην εφαρμογή της αρχής υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας

Για την εφαρμογή της αρχής αυτής το δείγμα θα πρέπει να είναι ομοιογενές, ιστροπικό και άμορφο. Το υλικό πρέπει να είναι ιξωδοελαστικό στις συνθήκες φόρτισης και η παραμόρφωση πρέπει να είναι γραμμική συνάρτηση της τάσης για πολύ μικρές τιμές της, όπως π.χ. 0.01%.

Επίσης για την εφαρμογή της Σχέσης 2.4, των Williams-Landel-Ferry το δείγμα πρέπει να εκτίθεται σε ένα εύρος θερμοκρασιών [T_g , T_g+100], στο οποίο μελετώνται οι αντοχές. Ο προσδιορισμός των συντελεστών C_1 και C_2 απαιτεί εκτεταμένες δυναμικές δοκιμές σε πολλές συχνότητες φόρτισης και θερμοκρασίες, που αντιπροσωπεύουν τουλάχιστον εκατό σημεία μέτρησης.

2.4. Λειτουργία Θερμοστάτη

2.4.1. Γενικά στοιχεία

Ο θερμοστάτης είναι μια συσκευή ελέγχου, η οποία χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας είτε κάποιας συσκευής είτε κάποιου χώρου. Αυτό επιτυγχάνεται όταν ο θερμοστάτης είναι συνδεδεμένος και ελέγχει ένα μηχανισμό θέρμανσης ή ψύξης.

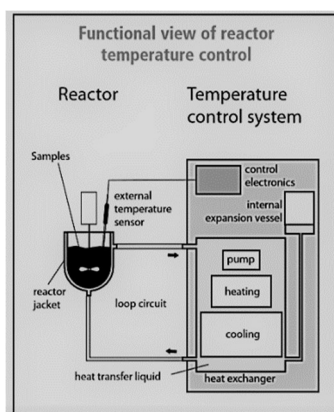
Αποτελείται από μια διάταξη μέτρησης της θερμοκρασίας, ένα είδος θερμομέτρου, ένα μηχανισμό καθορισμού της επιθυμητής θερμοκρασίας από το χρήστη της συσκευής και τέλος ένα μηχανισμό ο οποίος ενεργοποιεί αυτόματα τον μηχανισμό ψύξης ή θέρμανσης τον οποίο ελέγχει.

Με κάποια μέθοδο είτε καθαρά μηχανική (π.χ. με διμεταλλικό έλασμα) είτε ηλεκτρική, ενεργοποιεί ή αντίθετα διακόπτει τη λειτουργία του μηχανισμού θέρμανσης ή ψύξης.

2.4.2. Αρχή λειτουργίας θερμοστάτη

Πολλές φορές κρίνεται απαραίτητο σε διάφορα πειράματα να γνωρίζουμε την ακριβή θερμοκρασία ενός δοκιμίου, προκειμένου να εξαχθούν ορθά αποτελέσματα. Επίσης οι επιθυμητές θερμοκρασίες πρέπει να επιτυγχάνονται με εξαιρετική αξιοπιστία αλλά και ταχύτητα.

Οι περισσότεροι θερμοστάτες αποτελούνται από αντιδραστήρες κατασκευασμένους από γυαλί ή χάλυβα. Οι χαλύβδινοι αντιδραστήρες είναι συνήθως πιο ανθεκτικοί ενώ οι γυάλινοι προσφέρουν τη δυνατότητα στο χρήστη να βλέπει το εσωτερικό του δοχείου. Συνήθως οι αντιδραστήρες έχουν ένα εσωτερικό δοχείο, το οποίο περιέχει την ουσία που επιθυμούμε να θερμανθεί ή να ψυχθεί. Αυτό το δοχείο συνδέεται με το χιτώνιο του αντιδραστήρα μέσω βαλβίδων και αλλάζει τη θερμοκρασία του υλικού.



Εικόνα 2.6: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας θερμοστάτη
Figure 2.6: Schematic thermostat display

Όταν χρησιμοποιούμε ένα τέτοιο δυναμικό σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας οφείλουμε να λάβουμε υπόψη μας διάφορους παράγοντες και συνθήκες που θα επηρεάσουν το αποτέλεσμά μας. Για να μπορέσουμε να διαμορφώσουμε ένα σύστημα αξιολόγησης τέτοιων συστημάτων αρχικό μέλημα είναι η ασφάλεια του χρήστη. Πέρα όμως από την ασφάλεια του χρήστη τρεις είναι οι παράγοντες βάσει των οποίων αξιολογείται η σωστή διαμόρφωση ενός συστήματος:

1. Εξασφάλιση σταθερών συνθηκών λειτουργίας, η οποία θα αναπτυχθεί στη συνέχεια.
2. Προστασία της συσκευής.
3. Ασφαλής χρήση του συστήματος.

Εξασφάλιση σταθερών συνθηκών λειτουργίας

Η συμπεριφορά των δυναμικών αυτών συστημάτων εξαρτάται από τον τρόπο και το υλικό κατασκευής του αντιδραστήρα (γυαλί ή χάλυβας), όπως επίσης και από το πάχος των τοιχωμάτων του.

Επιπλέον, από τον κατασκευαστή του αντιδραστήρα καθορίζεται το επιτρεπόμενο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών, το οποίο ρυθμίζεται κάθε φορά εκ νέου στην αρχή της διαδικασίας. Επίσης, σε συγκεκριμένους θερμοστάτες σημαντικό ρόλο παίζει η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αντιδραστήρα και του υγρού που κυκλοφορεί μέσα στο θερμοστάτη (ΔT). Σε αυτή τη διαφορά θερμοκρασίας πιο ευαίσθητοι είναι οι θερμοστάτες από γυαλί. Όλοι οι θερμοστάτες έχουν συγκεκριμένα όρια διαφοράς θερμοκρασίας.

Οι ακόλουθοι παράγοντες επηρεάζουν το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας:

- Ο εναλλάκτης θερμότητας
- Οι βαλβίδες
- Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου

Ο χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία εξαρτάται από την ικανότητα ψύξης και θέρμανσης. Για να ορίσουμε την απαιτούμενη

θερμοκρασία του θερμοστάτη πρέπει να γνωρίζουμε τη μάζα του δοκιμίου, τις επιθυμητές διαφορές θερμοκρασίας καθώς επίσης και τα όρια του θερμοστάτη.

Η βαλβίδα που είναι ενσωματωμένη στο θερμοστάτη πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή, ώστε οι επιθυμητές θερμοκρασίες να επιτυγχάνονται γρήγορα και ελεγχόμενα, χωρίς να ξεπερνούν τα όρια που έχουν τεθεί. Προσοχή χρειάζεται στις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, καθώς το υγρό που περιέχεται στο δοχείο ενδέχεται να είναι ιξώδες και συνεπώς να αλλάξει μηχανική συμπεριφορά.

Η λειτουργία ενός θερμοστάτη πρέπει να είναι σταθερή ακόμα και σε μη ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος. Συνήθως οι θερμοστάτες, ειδικά στα εργαστήρια όπου γίνονται τα πειράματα, θα πρέπει να δουλεύουν ικανοποιητικά ακόμα και στους 35°C.

Ειδικά στην εκτέλεση συγκεκριμένων πειραμάτων η ακρίβεια ελέγχου της θερμοκρασίας είναι πολύ σημαντικός παράγοντας. Οι σύγχρονες μέθοδοι ελέγχου και επεξεργασίας είναι σε μεγάλο βαθμό ακριβείς. Κάθε φορά που μια ρύθμιση αλλάζει, το σύστημα αναπροσαρμόζεται γρήγορα χωρίς να αλλάζει η ροή της διαδικασίας. Συνεπώς, τα συστήματα στα οποία οι ρυθμίσεις αλλάζουν αυτόματα και προσαρμόζονται στις νέες συνθήκες είναι αυτά που θα μας δώσουν τα πιο ορθά αποτελέσματα. Συνοψίζοντας, η σταθερότητα των συνθηκών και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτώνται από το είδος του αντιδραστήρα, την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας και την αποτελεσματική λειτουργία του θερμοστάτη.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

3.1. Γενικός στόχος πειραμάτων

Βασικός στόχος των πειραμάτων είναι η δημιουργία της καμπύλης αναφοράς της κόλλας που μελετήθηκε και η επαλήθευσή της με αριθμητικές μεθόδους. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε χαλύβδινα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με την υπό μελέτη κόλλα σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και ταχύτητες εφελκυσμού. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμών και τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

3.2. Περιγραφή πειραματικής συσκευής

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή που φαίνεται στην Εικόνα 3.1, οι οποία συναρμολογήθηκε στο εργαστήριο για τις ανάγκες των συγκεκριμένων πειραμάτων και αποτελείται από δύο κύριες συσκευές:

1. Το θερμοστάτη.
2. Τη συσκευή εφελκυσμού.



Εικόνα 3.1: Πειραματική συσκευή
Figure 3.1: Experimental apparatus

Θερμοστάτης

Ο θερμοστάτης που χρησιμοποιήθηκε είναι της γερμανικής εταιρίας JULABO και συγκεκριμένα το μοντέλο JULABO F32-ME. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στην Εικόνα 3.2. Στην οθόνη του θερμοστάτη εμφανίζονται οι ενδείξεις της θερμοκρασίας εντός του δοχείου και της επιθυμητής θερμοκρασίας του δοκιμίου (Εικόνα 3.3).

Technical Data	
Order No.	0162902
Model name	TopLine
Category	Refrigerated - Heating Emulators
Working temperature range (°C)	-35...+200
Temperature control	PID, analog
Temperature stability (°C)	±0.01
Setting / display resolution	0.01 K/°C
Integrated program	7+10 steps
Temperature display	W/D
Heating capacity (kW)	2
Cooling capacity (Wattatt Effort)	H: 20, D: -20 -30 kW: 0.45 0.28 0.15 0.06
Pump capacity flow rate (l/min)	11-18
Pump capacity flow pressure (bar)	0.25-0.45
Bath opening / bath depth (W x L / D cm)	18 x 12 / 15
Pump connections	M10x1
Barbed fittings diameter (inner dia. / mm)	8 / 10
Filling volume (l/min)	8
Refrigerant stage 1	R134a
Filling volume refrigerant stage 1 (g)	150
Globul Watttrag Potential for R134a	1400
Carbon dioxide equivalent stage 1 (l)	0.257
External P100 sensor connection	integrated
Digital interfaces	RS232 Optional Profibus
Ambient temperature	5...40 K/°C
Dimensions W x L x H (mm)	37 x 42 x 54
Weight (kg)	3.0
Classification according to DIN EN 12454-1	Classification B (UL)
Included with each unit	2 barbed fittings suitable for tubing 8 and 10 mm outer dia. (pump) connections M10x1 female
Cooling of compressor	A1
Power requirement V / Hz / A	230/50-60/1.5 Additional voltage versions available

Εικόνα 3.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά θερμοστάτη
Figure 3.2: Technical characteristics of the thermostat



Εικόνα 3.3: Ενδείξεις θερμοστάτη: Πάνω: θερμοκρασία εντός του δοχείου, Κάτω: επιθυμητή θερμοκρασία του δοκιμίου

Figure 3.3: Thermostat indications: Up: temperature inside the container, Bottom: desired temperature of the specimen



Εικόνα 3.4: Θερμοστάτης JULABO F32-ME

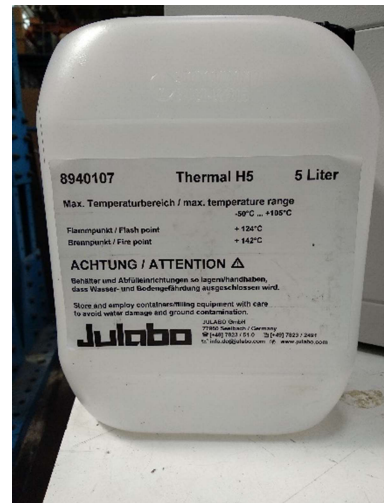
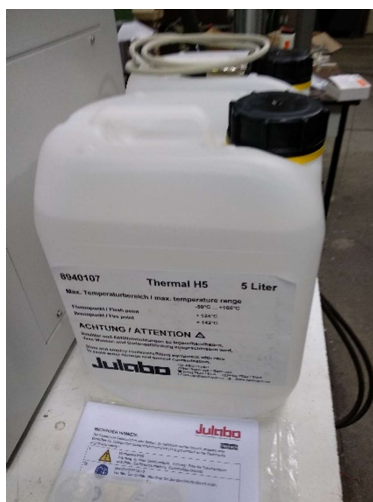
Figure 3.4: Thermostat JULABO F32-ME



Για τη λειτουργία του θερμοστάτη και την εναλλαγή της θερμότητας χρησιμοποιήθηκε ειδικό θερμαντικό λάδι με βάση τη σιλικόνη, της ίδιας εταιρίας, που ονομάζεται Thermal H5. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη χρήση του, καθώς το συγκεκριμένο λάδι μπορεί να καταστρέψει τους ελαστικούς σωλήνες από σιλικόνη, που σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του. Οι ιδιότητές του παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.5:

Eigenschaft	Wert
Arbeitstemperatur °C	-50 ... +105
Flammpunkt °C	+124
Brennpunkt °C	+142
Viskosität (kinematisch bei 20 °C) mm ² /s	5.66
Dichte (bei 20 °C) g/cm ³	0.92
Stockpunkt °C	-100
Siedepunkt °C	+288
Zündtemperatur °C	+350
Farbe	transparent
Thermischer Ausdehnungskoeffizient K ⁻¹	0.00094
Wärmeleitfähigkeit [W/(m x K)]	0.116
Spezifischer Durchgangswiderstand [Ohm x cm]	4 x 10 ¹⁴

Εικόνα 3.5: Ιδιότητες θερμαντικού λαδιού H5
Figure 3.5: Heating oil properties H5



Εικόνα 3.6: Ειδικό θερμαντικό λάδι JULABO H5
Figure 3.6: Heating oil JULABO H5

Συσκευή Εφελκυσμού

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε (MTS 810 – Εικόνες 3.8 – 3.9) παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7:

Load unit specifications			
Model	318.10	318.25	318.50
Force capacity (maximum)	100 kN (22 kip)	250 kN (55 kip)	500 kN (110 kip)
Available actuator ratings	15, 25, 50, 100 kN (3.3, 5.5, 11, 22 kip)	100, 250 kN (22, 55 kip)	250, 500 kN (55, 100 kip)
Vertical test space* (A)	1308 mm (51.5 in)	1625 mm (64 in)	2108 mm (83 in)
Working height (B)	889 mm (35 in)	889 mm (35 in)	889 mm (35 in)
Column spacing (C)	533 mm (21 in)	635 mm (25 in)	762 mm (30 in)
Column diameter (D)	64 mm (2.5 in)	76 mm (3 in)	102 mm (4 in)
Base width (E)	864 mm (34 in)	1003 mm (39.5 in)	1245 mm (49 in)
Base depth (F)	610 mm (24 in)	762 mm (30 in)	914 mm (36 in)
Diagonal Clearance (G)	2718 mm (107 in)	3251 mm (128 in)	3835 mm (151 in)
Overall Height (H)	2540 mm (100 in)	3023 mm (119 in)	3581 mm (141 in)
Stiffness†	2.6 x 10 ⁸ N/m (1.5 x 10 ⁸ lb/in)	4.3 x 10 ⁸ N/m (2.4 x 10 ⁸ lb/in)	7.5 x 10 ⁸ N/m (4.3 x 10 ⁸ lb/in)
Weight	500 kg (1100 lb)	910 kg (2000 lb)	1770 kg (3900 lb)

Εικόνα 3.7: Τεχνικά Χαρακτηριστικά συσκευής εφελκυσμού MTS 810
Figure 3.7: Technical Specifications of MTS 810 Tension Machine



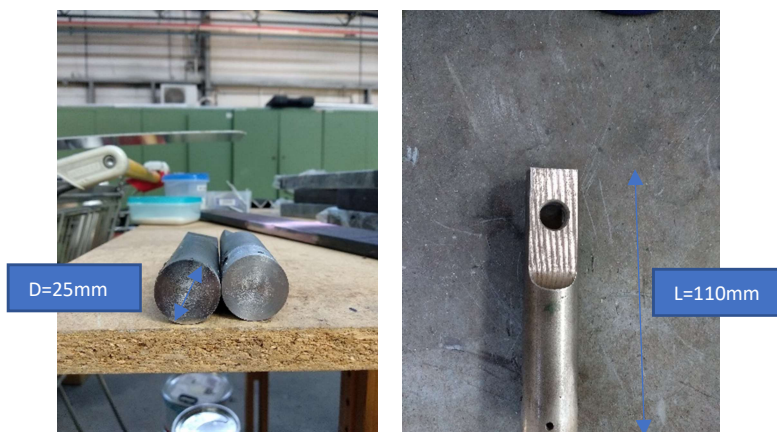
Εικόνα 3.8: Συσκευή εφελκυσμού MTS 810
Figure 3.8: MTS 810 Tension Apparatus



Εικόνα 3.9: Συσκευή εφελκυσμού MTS 810
Figure 3.9: MTS 810 Tension Apparatus

Δοκίμια Χάλυβα

Για την εκτέλεση των δοκιμών εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινα, κυλινδρικά δοκίμια με μήκος $L=110\text{mm}$ και διάμετρο $d=25\text{mm}$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10. Ο χάλυβας είναι κατηγορίας S355.



Εικόνα 3.10: Δοκίμια χάλυβα
Figure 3.10: Steel specimens

Κόλλα

Η κόλλα που μελετήθηκε είναι προϊόν της αγγλικής εταιρίας LORD και συγκεκριμένα η ακρυλική κόλλα LORD 410, σε συνδυασμό με τον επιταχυντή LORD 19 ή 19GB, η οποία μπορεί να αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους σύνδεσης στοιχείων. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός κόλλας-επιταχυντή λειτουργεί πολύ καλά σε χαμηλές θερμοκρασίες και σε συνθήκες πρόσκρουσης.

Η κόλλα LORD 410, όταν συνδυαστεί με τον παραπάνω επιταχυντή προσφέρει τη δυνατότητα συγκόλλησης ενός μεγάλου εύρους επεξεργασμένων και μη μετάλλων καθώς επίσης και διαφόρων πλαστικών υλικών.

Στην Εικόνα 3.11 παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες της συγκεκριμένης κόλλας:

Typical Properties*

Appearance	Off-white to Tan Paste
Viscosity , cP @ 77°F (25°C) Brookfield	100,000 - 300,000
Density , lb/gal (kg/m ³)	9.15 - 9.60 (1096 - 1150)
Flash Point , °F (°C), Closed Cup	59 (15)
Working Time , min @ 75°F (24°C)	20 - 45
Time to Handling Strength , min @ 75°F (24°C) 50 psi Shear	60 - 120
Full Cure Time , hr @ 75°F (24°C)	24
Mixed Appearance	Color dependent on accelerator used
Mixed Solids Content by Weight , %	100

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

Εικόνα 3.11: Χαρακτηριστικά κόλλας LORD 410
Figure 3.11: Characteristics of the adhesive LORD 410



Εικόνα 3.12: Κόλλα LORD 410
Figure 3.12: Adhesive LORD 410

3.3. Διαδικασία εκτέλεσης πειραμάτων

Όπως προαναφέρθηκε, στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί η δημιουργία της καμπύλης αναφοράς της κόλλας LORD 410. Για το σκοπό αυτό απαιτείται κατ' αρχήν να κατασκευαστούν οι ισόθερμες καμπύλες τάσης – ταχύτητας φόρτισης για ένα εύρος θερμοκρασιών. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκαν οκτώ (8) θερμοκρασίες (-20°C, 0°C, 10°C, 23°C, 40°C, 50°C, 60°C, 80°C). Για κάθε θερμοκρασία εφαρμόστηκαν τρεις διαφορετικές ταχύτητες εφελκυσμού, οι οποίες μπορούσαν εύκολα να επιτευχθούν πειραματικά, ενώ σε κάθε ταχύτητα πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές εφελκυσμού/επαναλήψεις, για πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

3.3.1 Προετοιμασία δοκιμίων

Βασικό ζήτημα που έπρεπε να επιλυθεί, πριν την έναρξη των πειραμάτων ήταν η κατάλληλη διαμόρφωση των δοκιμίων, η οποία θα επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας σε όλο το μήκος τους και ιδιαίτερα στις επιφάνειες συγκόλλησης. Δεδομένου ότι η λειτουργία του θερμοστάτη βασίζεται στην κυκλοφορία του θερμαντικού λαδιού μέσα σε ειδικό σωλήνα, στα δοκίμια ανοίχθηκε τρύπα διαμέτρου ίσης με τη διάμετρο του σωλήνα, κοντά στο σημείο συγκόλλησης των χαλύβδινων δοκιμίων. Σε χαμηλότερο σημείο ανοίχθηκε μικρότερη τρύπα για την τοποθέτηση του θερμομέτρου.



Εικόνα 3.13: Οπή για την εισαγωγή του σωλήνα θερμαντικού λαδιού
Figure 3.13: Opening for the insertion of heat oil pipe



Εικόνα 3.14: Οπή για την εισαγωγή του θερμομέτρου
Figure 3.14: Opening for the insertion of the thermometer

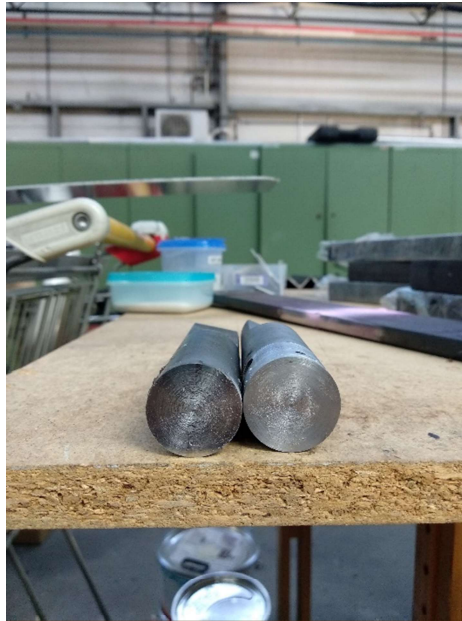
Αφού καταλήξαμε στη διαμόρφωση του δοκιμίου έπρεπε να τυποποιηθεί η διαδικασία συγκόλλησης. Όπως αναπτύχθηκε στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, για την επίτευξη σωστής και χωρίς ανομοιογένειες συγκόλλησης, οι επιφάνειες συγκόλλησης πρέπει να είναι λείες. Για το λόγο αυτό οι επιφάνειες συγκόλλησης λειαίνονται με ειδικό τροχό και στη συνέχεια τοποθετούνται μέσα σε ακετόνη για να καθαριστούν από τυχόν σκόνες ή άλλα σωματίδια. Η ακετόνη (CH_3COCH_3) είναι ένας σημαντικός διαλύτης και τυπικό καθαριστικό σκευών σε χημικά εργαστήρια. Τέλος, τα δοκίμια στεγνώνονται από την ακετόνη με πεπιεσμένο αέρα.



Εικόνα 3.15: Δοχείο ακετόνης
Figure 3.15: Acetone vessel



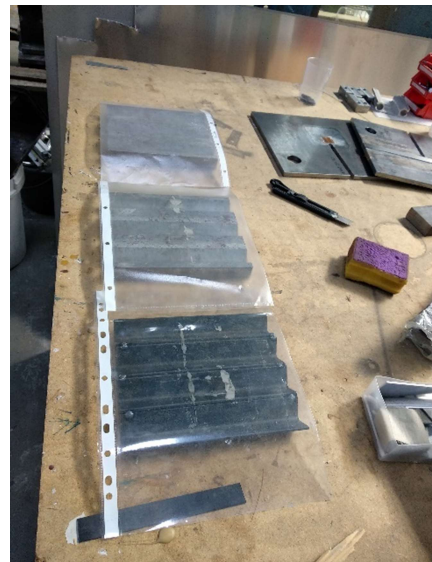
Εικόνα 3.16: Συσκευή πεπιεσμένου αέρα
Figure 3.16: Compressed air device



Εικόνα 3.17: Λείες επιφάνειες συγκόλλησης
Figure 3.17: Smooth welded surfaces

3.3.2 Διαδικασία συγκόλλησης

Μετά τη λείανση των προς συγκόλληση επιφανειών ακολουθεί η διαδικασία της συγκόλλησης. Για την καλύτερη κατανομή της κόλλας στην επιφάνεια συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκαν ειδικά διαμορφωμένα ελάσματα και ζελατίνες (Εικόνα 3.18).



Εικόνα 3.18: Ελάσματα και ζελατίνες
Figure 3.18: Metal sheets

Για τη συγκόλληση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ειδικό πιστόλι με αναμεικτήρες για τη σωστή ανάμειξη της κόλλας και του επιταχυντή, επίσης της εταιρίας LORD (Εικόνες 3.19 – 3.20).



Εικόνα 3.19: Πιστόλι και αναμεικτήρες
Figure 3.19: Pistol and mixers



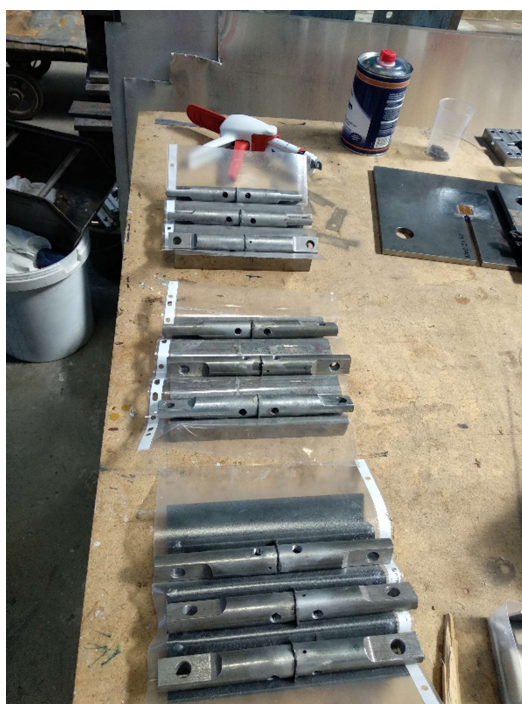
Εικόνα 3.20: Πιστόλι και αναμεικτήρες
Figure 3.20: Final welding pistol configuration

Η τοποθέτηση της κόλλας ξεκινάει περιμετρικά της επιφάνειας συγκόλλησης και προχωρεί προς το κέντρο της, μέχρι να καλυφθεί ολόκληρη η επιφάνεια. Επιλέχτηκε πάχος συγκολλητικού στρώματος 1mm, τυπικό πάχος για μεταλλικές κατασκευές. Για να εξασφαλιστεί σταθερό πάχος χρησιμοποιήθηκαν ειδικά πλαστικά σφαιρίδια με διάμετρο 1mm (Εικόνα 3.21).



Εικόνα 3.21: Ειδικά πλαστικά σφαιρίδια
Figure 3.21: Special plastic beads

Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη κόλλα φτάνει τις αντοχές της σε 24 ώρες, για μεγαλύτερη ασφάλεια τα δοκίμια, μετά τη συγκόλλησή τους αφήνονται επί τρεις (3) ημέρες, προκειμένου να επιτευχθούν οι τελικές αντοχές της κόλλας.



Εικόνα 3.22: Δοκίμια πριν τον εφελκυσμό τους
Figure 3.22: Specimens before tensing

3.3.3 Τελική διαμόρφωση πειραματικής διάταξης

Μετά το πέρας των τριών (3) ημερών ξεκινούν οι δοκιμές εφελκυσμού. Αρχικά, στις τρύπες που έχουν ανοιχτεί για το σκοπό αυτό προσαρμόζονται ειδικά μεταλλικά στοιχεία (Εικόνα 3.23), μέσα από τα οποία διέρχεται ο πλαστικός σωλήνας στον οποίο κυκλοφορεί το θερμαντικό λάδι. Για την καλύτερη τοποθέτηση χρησιμοποιήθηκε ειδικό λιπαντικό έλαιο.



Εικόνα 3.23: Θήκες για την τοποθέτηση του σωλήνα
Figure 3.23: Cases for fitting the tube



Εικόνα 3.24: Ειδικό λιπαντικό έλαιο
Figure 3.24: Special lubricating oil



Εικόνα 3.25: Τελική διαμόρφωση δοκιμίων
Figure 3.25: Final specimen configuration

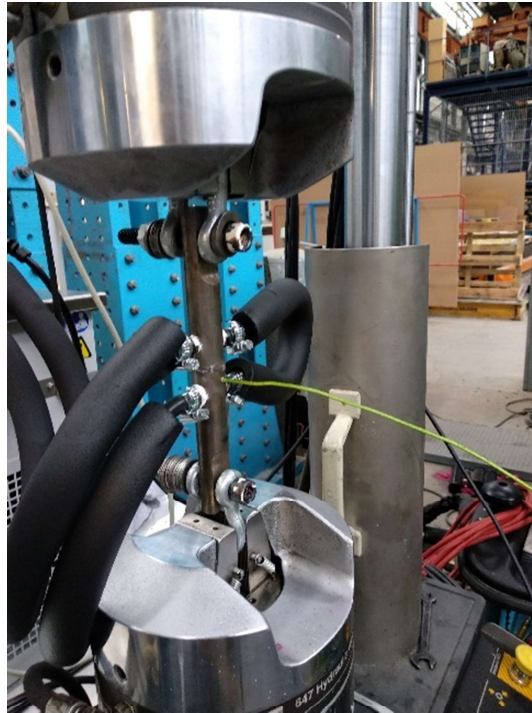
Για τη σωστή τοποθέτηση του εκάστοτε δοκιμίου στη συσκευή του εφελκυσμού προσαρμόστηκαν, στο επάνω και κάτω μέρος του, ειδικές λαβές που εμποδίζουν την εισαγωγή ροπής στο συνολικό σύστημα. Το δοκίμιο προσαρμόζεται στη συσκευή εφελκυσμού, ενώ για καλύτερη θερμομόνωση τοποθετείται γύρω από το δοκίμιο ειδικό μάλλινο υλικό (Εικόνες 3.27- 3.30). Ο θερμοστάτης τοποθετήθηκε δίπλα στη συσκευή και σε υπερυψωμένο σημείο, ώστε να εξασφαλίζεται, λόγω βαρύτητας, η συνεχής κυκλοφορία του θερμαντικού λαδιού. Τέλος, η συσκευή εφελκυσμού συνδέεται με φορητό υπολογιστή με ενδείξεις μετατόπισης, ταχύτητας εφελκυσμού, θερμοκρασίας θερμομέτρου δοκιμίου και θερμοκρασίας δωματίου.



Εικόνα 3.26: Λαβές για ορθή τοποθέτηση
Figure 3.26: Grips for proper fitting



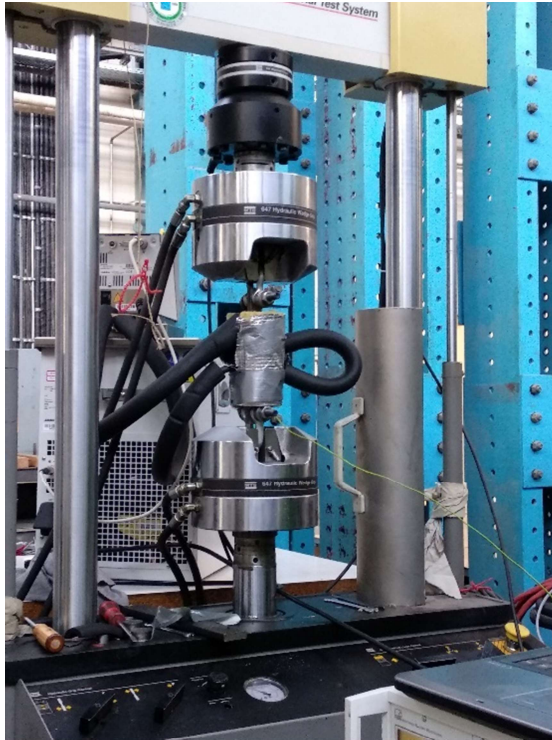
Εικόνα 3.27: Τελική διαμόρφωση πειραματικής συσκευής
Figure 3.27: Final configuration of the experimental apparatus



Εικόνα 3.28: Δοκίμιο στη συσκευή εφέλκυσμού με θερμομέτρο
Figure 3.28: Specimen on the tensile device with thermometer



Εικόνα 3.29: Πλήρης πειραματική διάταξη με θερμοστάτη
Figure 3.29: Complete experimental device with thermostat



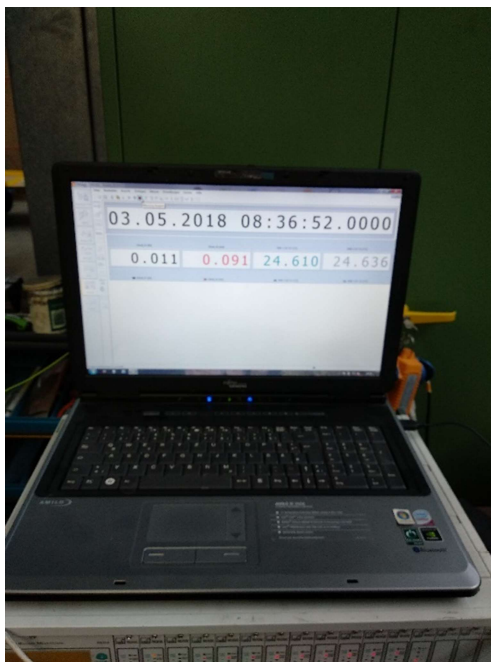
Εικόνα 3.30: Μάλλινο θερμομονωτικό υλικό
Figure 3.30: Warm thermal insulation material

3.3.4 Δοκιμές εφελκυσμού

Μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας, προχωρούμε στο κύριο μέρος του πειράματος, τη δοκιμή εφελκυσμού. Αρχικά, ανοίγουμε το θερμοστάτη και ρυθμίζουμε τη θερμοκρασία του θερμοστατικού λαδιού εντός του δοχείου του θερμοστατή. Είναι προφανές ότι η θερμοκρασία εντός του δοχείου του θερμοστατή είναι διαφορετική από αυτή που τελικώς αποκτά το δοκίμιο. Συνεπώς, πρέπει να υπάρχει συνεχής έλεγχος της θερμοκρασίας εντός του θερμοστατή και παρακολούθηση της ένδειξης του θερμομέτρου στο δοκίμιο, ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία. Για παράδειγμα, προκειμένου να επιτευχθεί θερμοκρασία -20°C στο δοκίμιο, η θερμοκρασία στο θερμοστάτη ρυθμίστηκε στους -22.50°C . Μετά τη σταθεροποίηση της επιθυμητής θερμοκρασίας, η οποία απαιτούσε ένα χρονικό διάστημα που μπορούσε να ποικίλει από δεκαπέντε (15) έως ενενήντα (90) λεπτά, περιμένουμε επιπλέον πέντε (5) λεπτά για να μην υπάρχουν διακυμάνσεις στο δείκτη ένδειξης της θερμοκρασίας του δοκιμίου στο φορητό υπολογιστή και ρυθμίζουμε τη ταχύτητα φόρτισης που επιθυμούμε.

Ενεργοποιούμε τη συσκευή εφελκυσμού για τη συγκεκριμένη κάθε φορά ταχύτητα και αναμένουμε μέχρι να υπάρξει θραύση. Οι ταχύτητες που επιλέχθηκαν είναι $0.1\text{mm}/\text{min}$, $1\text{mm}/\text{min}$ και $10\text{mm}/\text{min}$, οι οποίες θεωρούνται αρκετά αντιπροσωπευτικές αλλά είναι και αρκετά εύχρηστες, καθώς προσαρμόζονται εύκολα στη λογαριθμική κλίμακα που θα χρησιμοποιήσουμε για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αλλά και τη δημιουργία της καμπύλης αναφοράς. Ειδικά η ταχύτητα $1\text{mm}/\text{min}$ προβλέπεται στο πρότυπο DIN EN 15870.

Μετά το πέρας της δοκιμής, τα δοκίμια καθαρίζονται πάλι με τον τροχό και ακολουθείται η ίδια διαδικασία για τις επόμενες σειρές πειραμάτων.



Εικόνα 3.31: Φορητός υπολογιστής με ενδείξεις μετατόπισης, ταχύτητας, θερμοκρασίας θερμομέτρου και θερμοκρασίας δωματίου
Figure 3.31: Laptop with indications of transition, speed, temperature of the thermometer and room temperature



Εικόνα 3.32: Δοκίμιο ύστερα από τη θραύση του
Figure 3.32: Specimen after crashing

3.3.5 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων ακολουθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος της πρώτης σειράς, στους 23°C και με ταχύτητα εφελκυσμού 1mm/min. Τα

αποτελέσματα των υπόλοιπων πειραμάτων παρατίθενται στο Παράρτημα Α στην ηλεκτρονική μορφή της εργασίας.

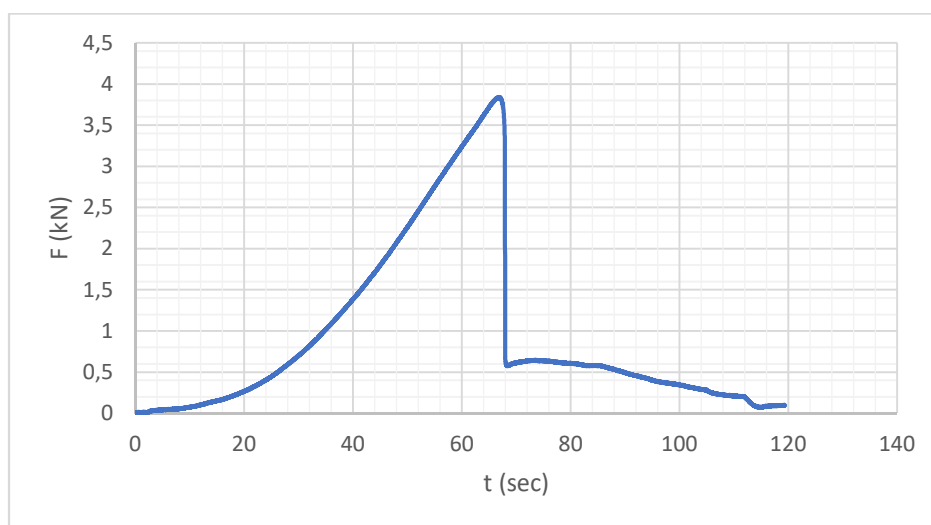


Εικόνα 3.33: Δοκίμιο πειράματος σε θερμοκρασία 23οC και ταχύτητα 1mm/min
Figure 3.33: Experimental specimen at 23°C and 1mm / min

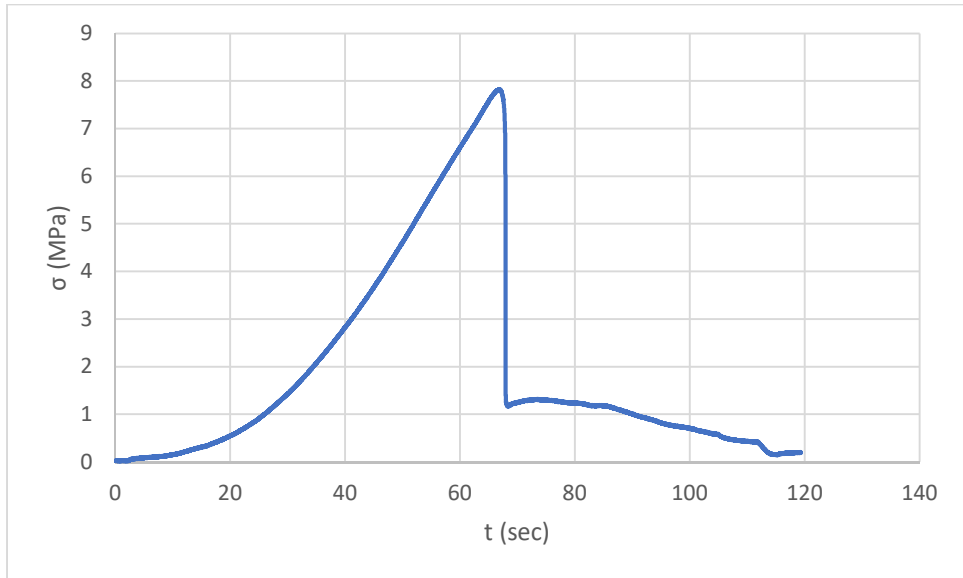
Από κάθε πείραμα λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:

- Μετατόπιση (d)
- Δύναμη (F)
- Θερμοκρασία δοκιμίου στο ύψος της συγκόλλησης (T)
- Θερμοκρασία δωματίου (T_i)

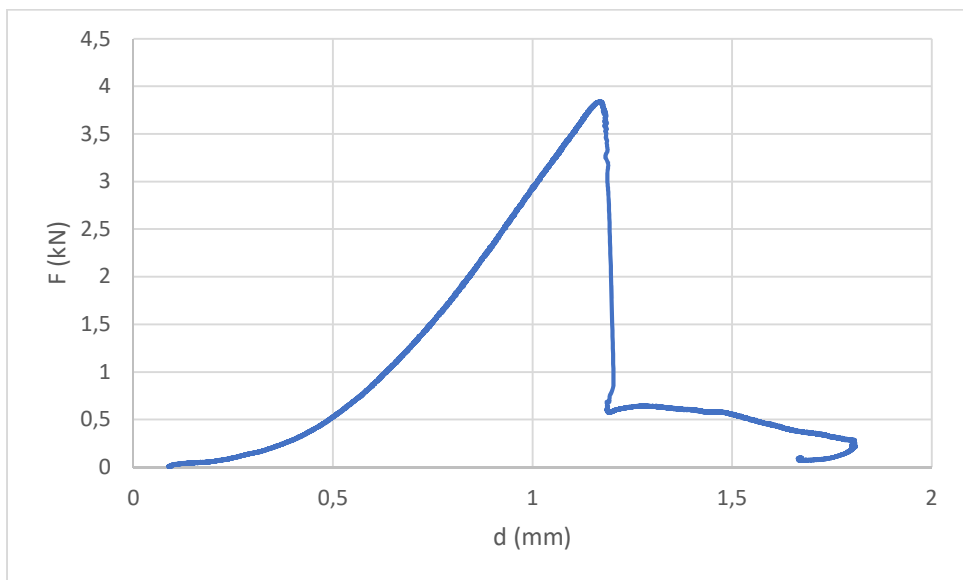
Τα διαγράμματα που κατασκευάζουμε για κάθε πείραμα παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 3.1-3.4:



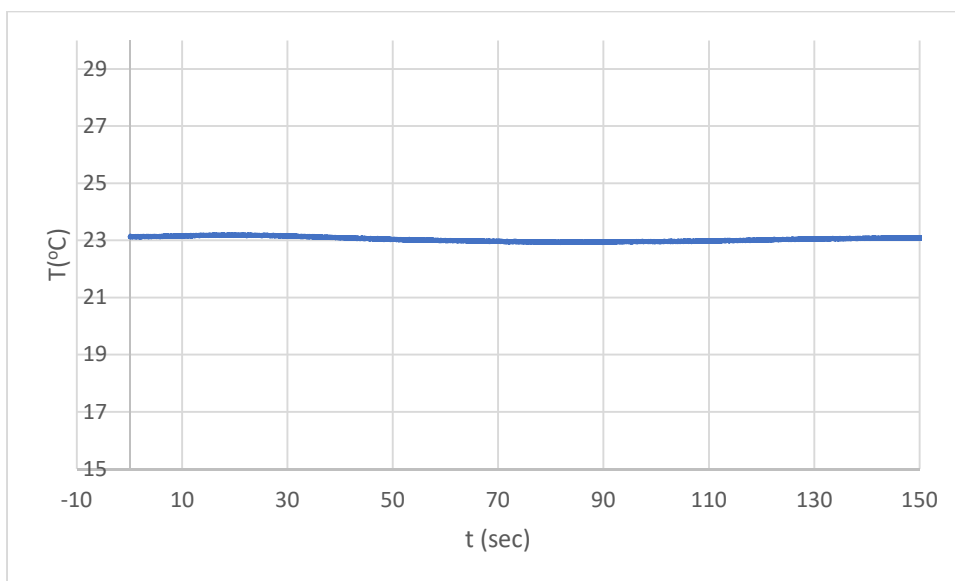
Διάγραμμα 3.1: Δύναμη-χρόνος
Diagram 3.1: Load-time



Διάγραμμα 3.2: Τάση-Μετατόπιση
Diagram 3.2: Stress-transition



Διάγραμμα 3.3: Δύναμη-Μετατόπιση
Diagram 3.3: Load-transition

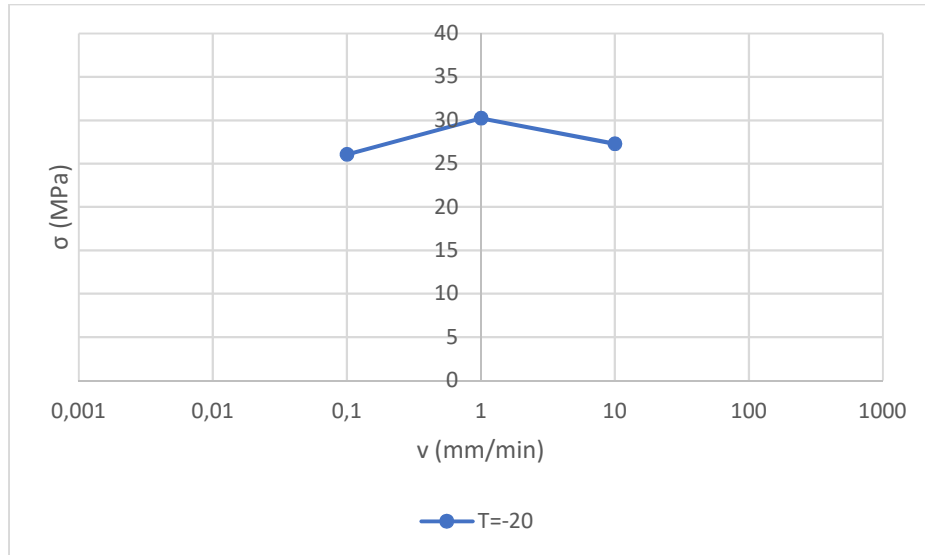


Διάγραμμα 3.4: Θερμοκρασία-Χρόνος
Diagram 3.4: Temperature-time

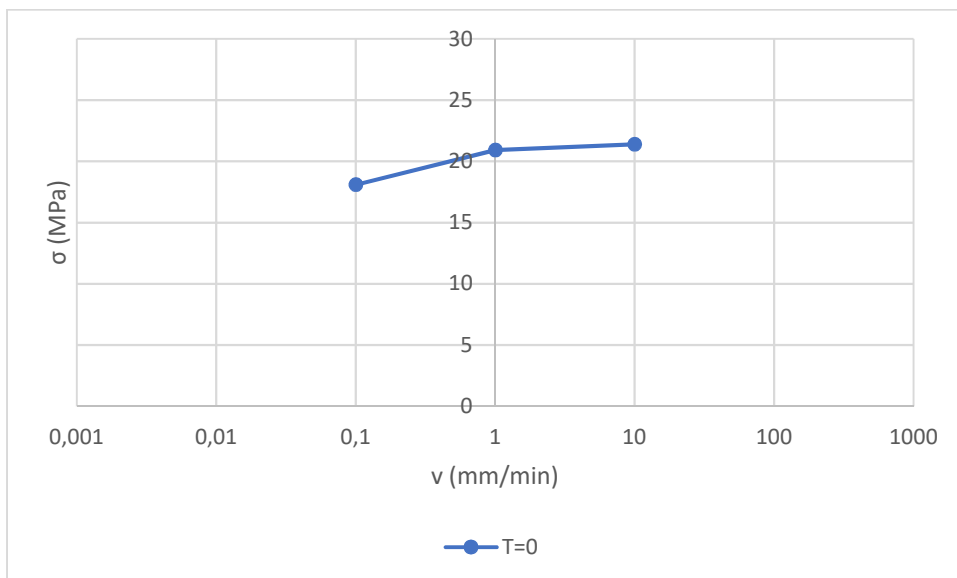
3.3.6 Κατασκευή ισόθερμων καμπυλών

Για την κατασκευή της ισόθερμης καμπύλης τάσης – ταχύτητας εφελκυσμού για κάθε θερμοκρασία, βασικό δεδομένο που λαμβάνουμε από κάθε πείραμα είναι η μέγιστη τάση. Αυτή προκύπτει διαιρώντας τη μέγιστη δύναμη στο σημείο θραύσης, η οποία σε κάθε πείραμα αναγράφεται στο φορητό υπολογιστή, με την επιφάνεια της συγκόλλησης. Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε 72 φορές (8 διαφορετικές θερμοκρασίες x 3 διαφορετικές ταχύτητες x 3 επαναλήψεις σε κάθε ταχύτητα). Σε δύο περιπτώσεις, λόγω ανθρώπινου σφάλματος, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν ήταν απορριπτέα.

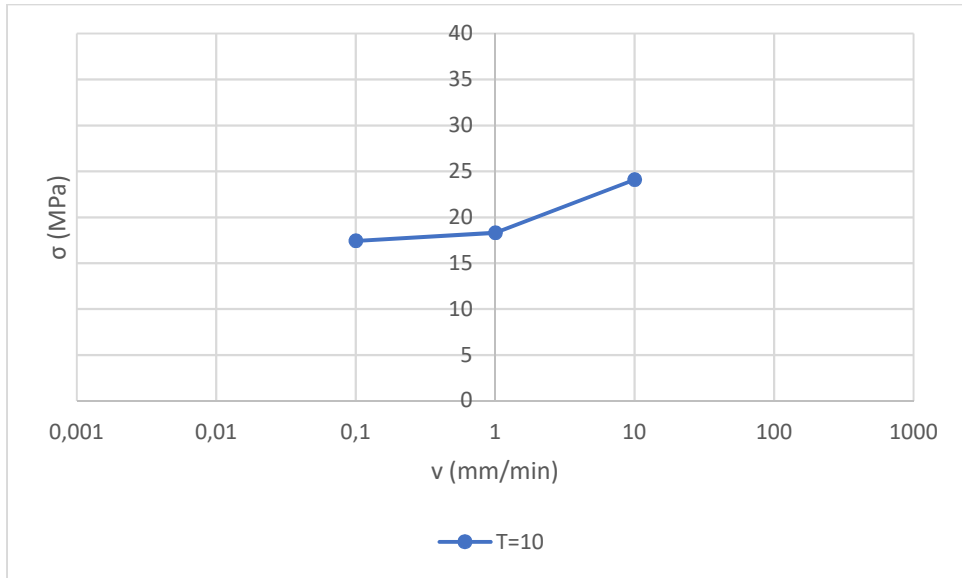
Τελικώς, από κάθε μια από τις οκτώ (8) σειρές πειραμάτων λαμβάνουμε εννέα (9) τιμές τάσης, δηλαδή τρεις (3) τιμές/επαναλήψεις - από τις οποίες εξάγουμε το μέσο όρο - για κάθε μία από τις τρεις (3) ταχύτητες εφελκυσμού. Συνεπώς, για κάθε θερμοκρασία έχουμε τρία σημεία, δηλαδή τρεις διαφορετικές τιμές τάσης (μέσος όρος των τριών επαναλήψεων) για τρεις διαφορετικές ταχύτητες. Έτσι προκύπτουν τελικώς οι ισόθερμες καμπύλες για κάθε θερμοκρασία, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία της τελικής καμπύλης αναφοράς. Οι ισόθερμες καμπύλες για τις θερμοκρασίες που επιλέξαμε, παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 3.5-3.12:



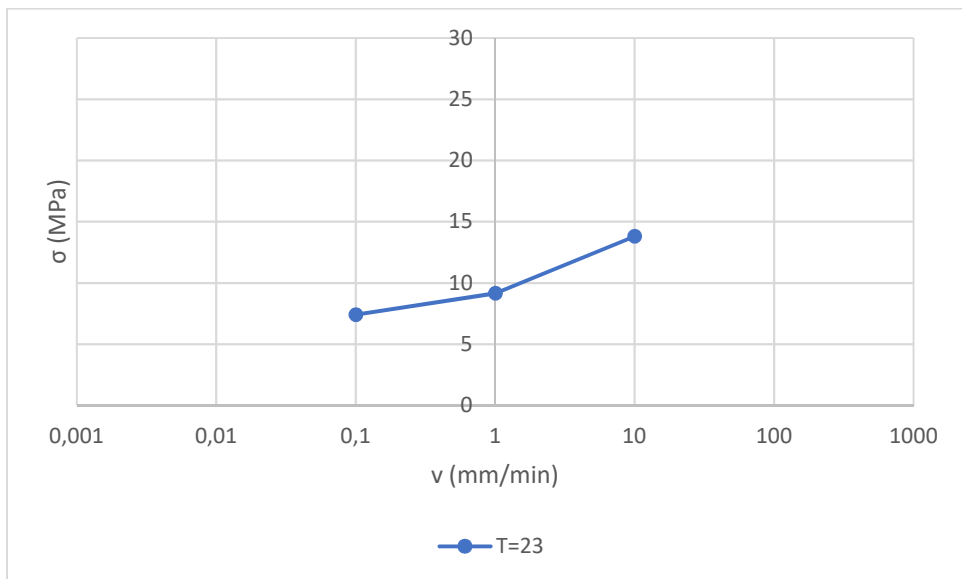
Διάγραμμα 3.5: Ισόθερμη καμπύλη για -20°C
Diagram 3.5: Isothermal curve for -20°C



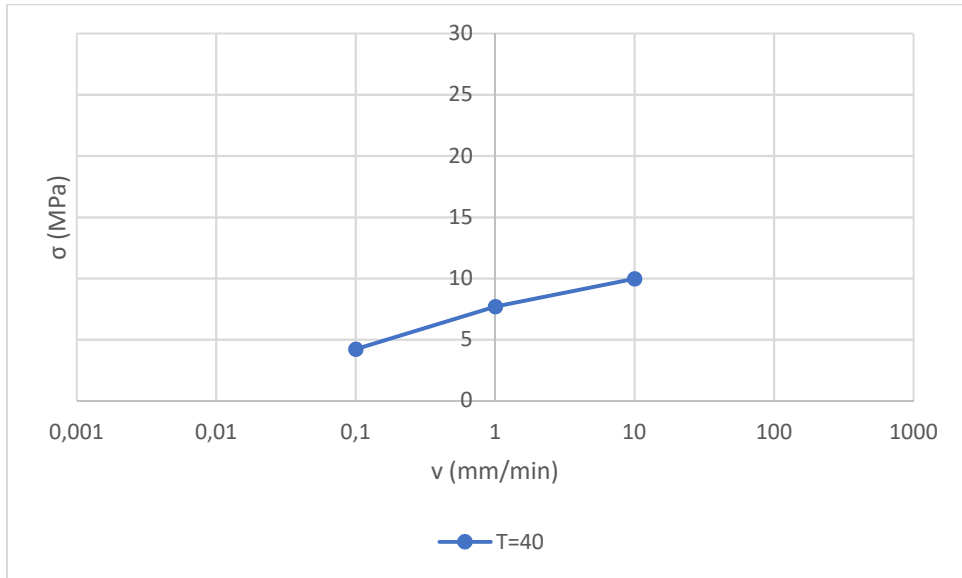
Διάγραμμα 3.6: Ισόθερμη καμπύλη για 0°C
Diagram 3.6: Isothermal curve for 0°C



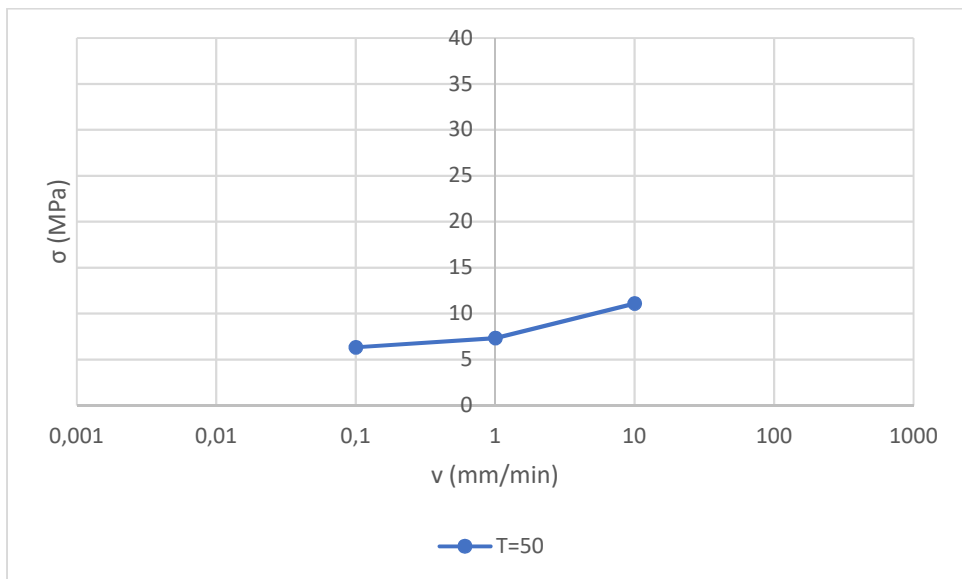
Διάγραμμα 3.7: Ισόθερμη καμπύλη για 10°C
Diagram 3.7: Isothermal curve for 10°C



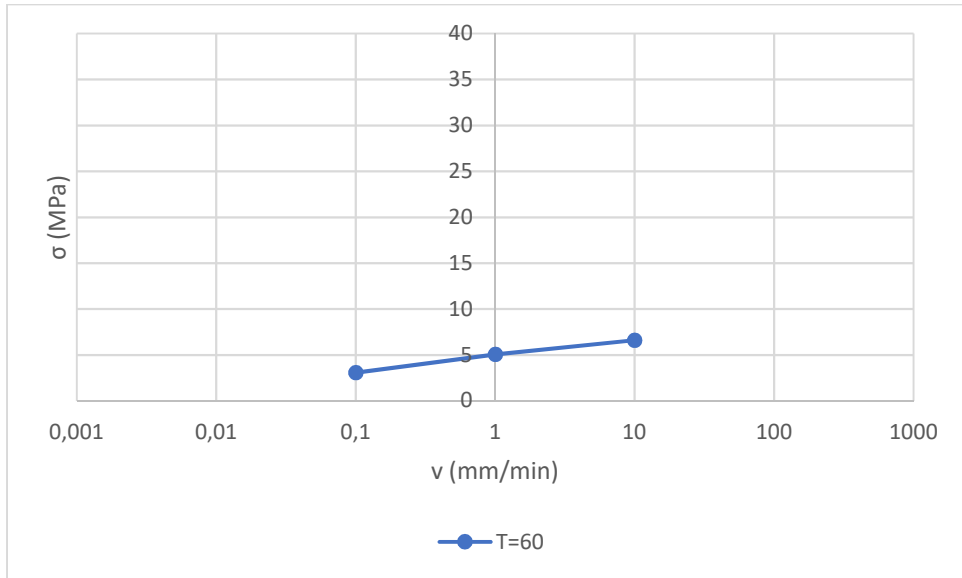
Διάγραμμα 3.8: Ισόθερμη καμπύλη για 23°C
Diagram 3.8: Isothermal curve for 23°C



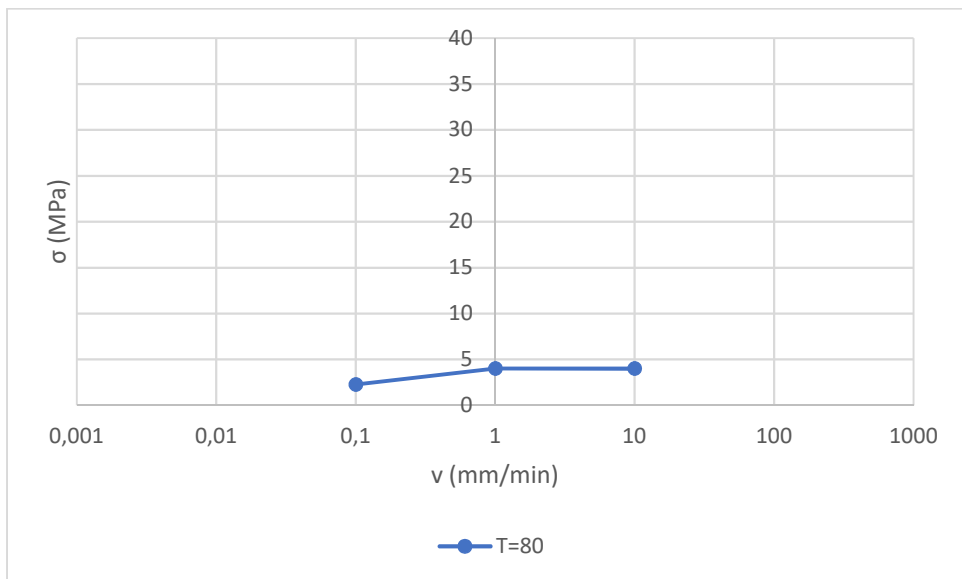
Διάγραμμα 3.9: Ισόθερμη καμπύλη για 40°C
Diagram 3.9: Isothermal curve for 40°C



Διάγραμμα 3.10: Ισόθερμη καμπύλη για 50°C
Diagram 3.10: Isothermal curve for 50°C



Διάγραμμα 3.11: Ισόθερμη καμπύλη για 60°C
Diagram 3.11: Isothermal curve for 60°C



Διάγραμμα 3.12: Ισόθερμη καμπύλη για 80°C
Diagram 3.12: Isothermal curve for 80°C

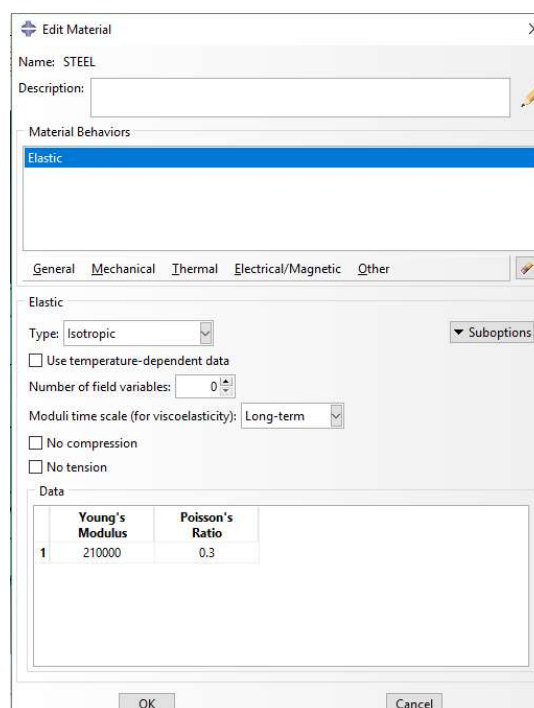
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική διερεύνηση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι το Abaqus FEA, που δημιουργήθηκε το 1978. Πρόκειται για ένα από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων με ευρεία εφαρμογή σε προσομοιώσεις πειραμάτων αλλά και σε θέματα μηχανολογικού ενδιαφέροντος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση Abaqus/Standard και συγκεκριμένα η έκδοση 6.14, που δημοσιεύθηκε το 2014, σε γλώσσα προγραμματισμού Python. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνει πολύ καλή προσομοίωση σε περιπτώσεις μη γραμμικής συμπεριφοράς συστημάτων, όπως αυτής που μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.4.1 Προσομοίωση ιδιοτήτων υλικών

Για την προσομοίωση των δοκιμών χάλυβα χρησιμοποιήθηκε γραμμικό ελαστικό υλικό με τις ιδιότητες του χάλυβα S355. Δεν κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή μετελαστικού κλάδου στο συγκεκριμένο μοντέλο, καθώς η κόλλα ήταν το κρίσιμο υλικό με αντοχή σημαντικά μικρότερη από αυτή του χάλυβα. Συνεπώς θα υπήρχε επιβάρυνση του μοντέλου χωρίς ουσιαστικό λόγο.

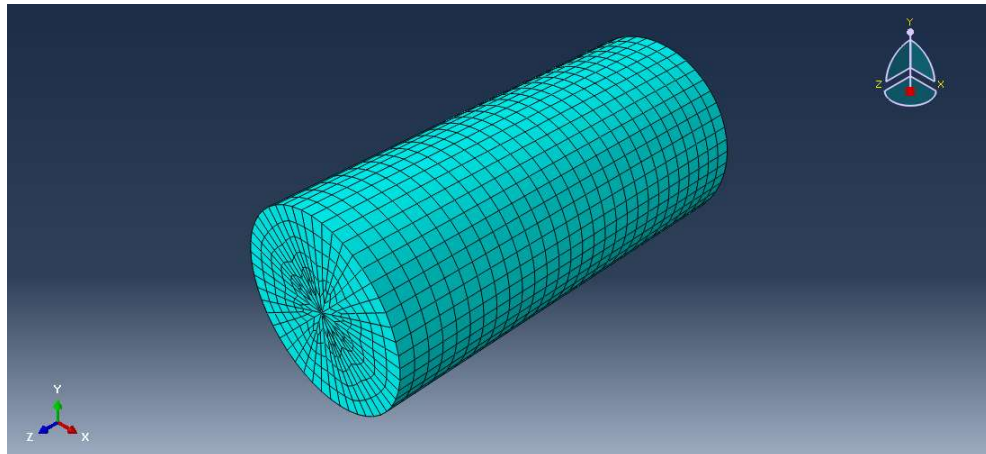


Εικόνα 4.1: Προσομοίωση χάλυβα σαν ελαστικό υλικό
Figure 4.1: Simulation of steel as an elastic material

Τα χαρακτηριστικά της κόλλας και ο τρόπος προσομοίωσης της συμπεριφοράς της θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

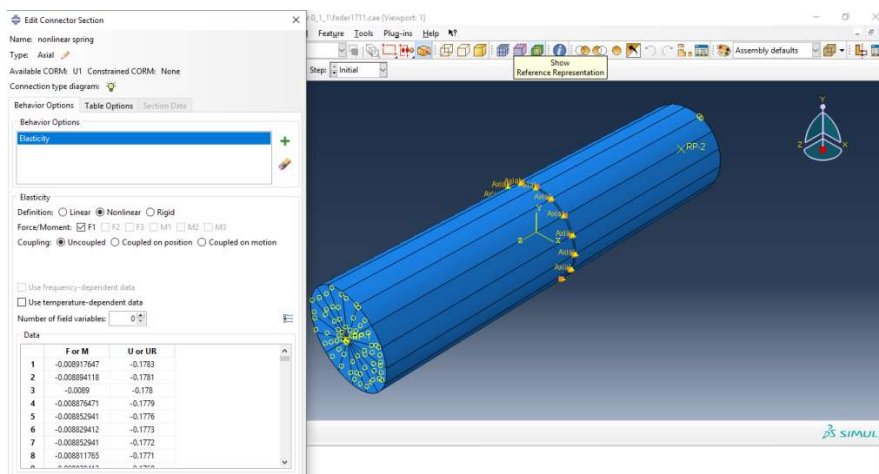
4.4.2 Αριθμητικό μοντέλο

Η προσομοίωση των δοκιμών χάλυβα έγινε με χρήση στοιχείων Solid, για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



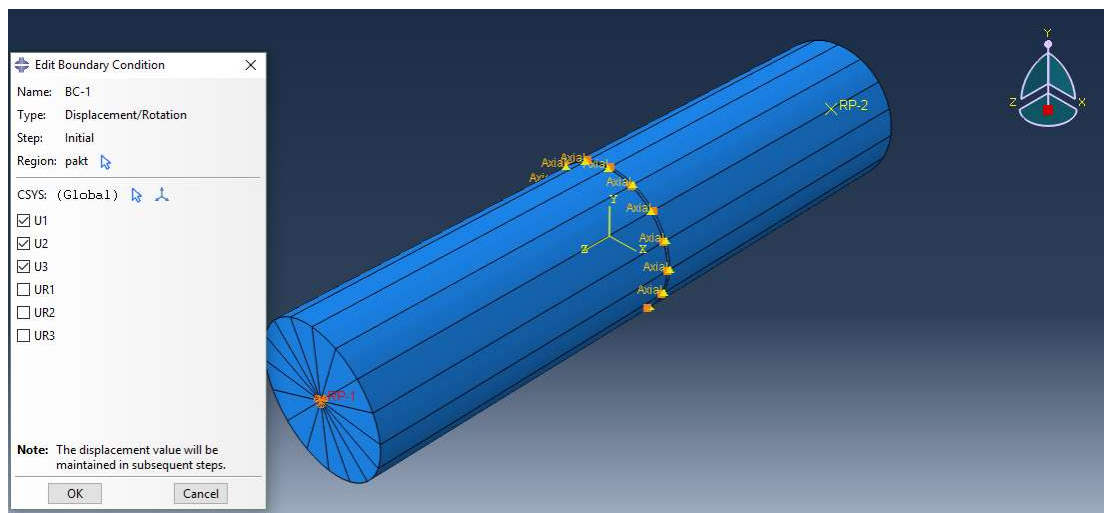
Εικόνα 4.2: Προσομοίωση χάλυβα με Solid Elements.
Figure 4.2: Simulation of steel with Solid Elements

Για την προσομοίωση της κόλλας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία Wire Elements και συγκεκριμένα δεκαεπτά (17), καθώς αυτά είναι ικανά να προσομοιώσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τη μη γραμμική συμπεριφορά που εμφανίζει η κόλλα. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.3.5, από κάθε πείραμα λαμβάναμε μια καμπύλη δύναμης - μετατόπισης. Οι συντεταγμένες αυτής της καμπύλης χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της κόλλας.



Εικόνα 4.3: Προσομοίωση κόλλας με Wire Elements
Figure 4.3: Simulation of adhesive material with Wire Elements

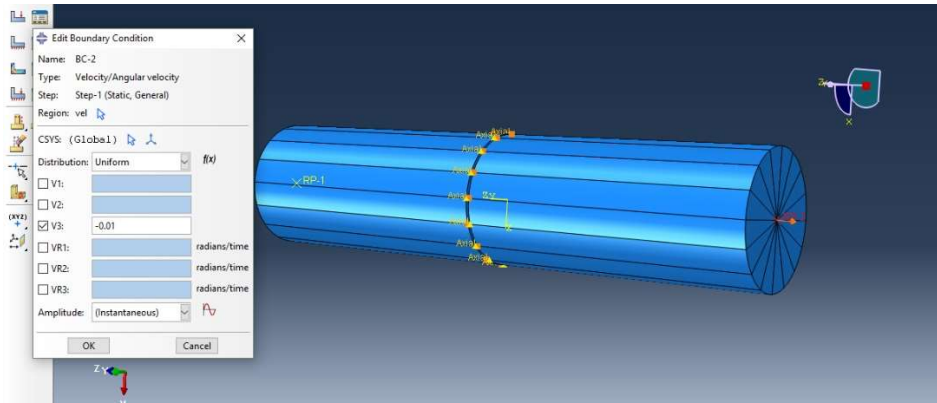
Στο κάτω μέρος του δοκιμίου τοποθετήθηκαν πακτώσεις για καλύτερη προσομοίωση του πειράματος (Εικόνα 4.4) . Με τον τρόπο αυτό περιορίστηκαν οι μετατοπίσεις και προς τις τρεις διευθύνσεις, ενώ οι περιστροφές αφήθηκαν ελεύθερες, κάτι που όμως δεν επηρέασε τα τελικά αποτελέσματα, αφού η εφαρμοζόμενες ταχύτητες δεν προκαλούν ροπές.



Εικόνα 4.4: Πάκτωση στο κάτω άκρο του δοκιμίου
Figure 4.4: Fix at the lower end of the specimen

Τέλος, σημαντική και κρίσιμη ήταν η προσομοίωση της ταχύτητας (Εικόνα 4.5). Καθώς το συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν έχει σταθερές μονάδες μέτρησης δεν ήταν δυνατόν να τεθεί μια τιμή, π.χ. 1mm/min, προς την επιθυμητή διεύθυνση. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, εισήχθηκε ως ταχύτητα το πηλίκο της συνολικής μετατόπισης προς τη συνολική χρονική διάρκεια καθενός πειράματος. Με τον τρόπο αυτό πρόκυπτε μια ταχύτητα που μας έδινε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, κοντά στα πειραματικά, με μία μέγιστη απόκλιση γύρω στο 2%. Για παράδειγμα, στο πρώτο πείραμα στους 23°C η μέγιστη μετατόπιση ήταν 1.2mm και ο συνολικός χρόνος 118sec. Συνεπώς η ταχύτητα που εισήχθηκε στο μοντέλο ήταν $\frac{1.2}{118} \approx 0.01\text{mm/sec}$.

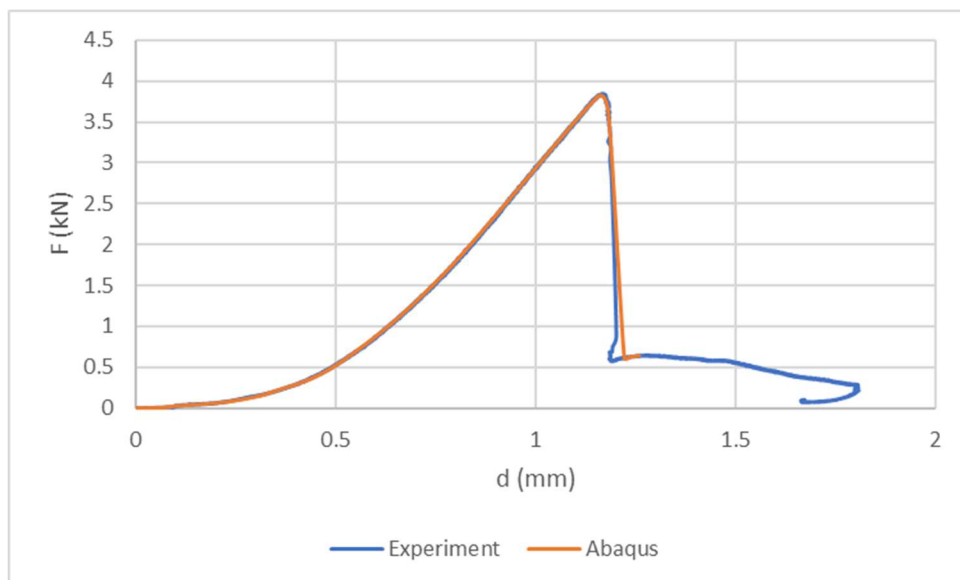
Στο σημείο αυτό αξίζει να τονίσουμε ότι δεν ήταν πάντα εύκολο να βρεθεί η σωστή ταχύτητα, καθώς τα πειράματα δεν ξεκινούσαν πάντα ομαλά ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η πραγματική διάρκειά τους ήταν πολύ μικρότερη από την καταγεγραμμένη. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εκτίμηση της ταχύτητας έγινε προσεγγιστικά.



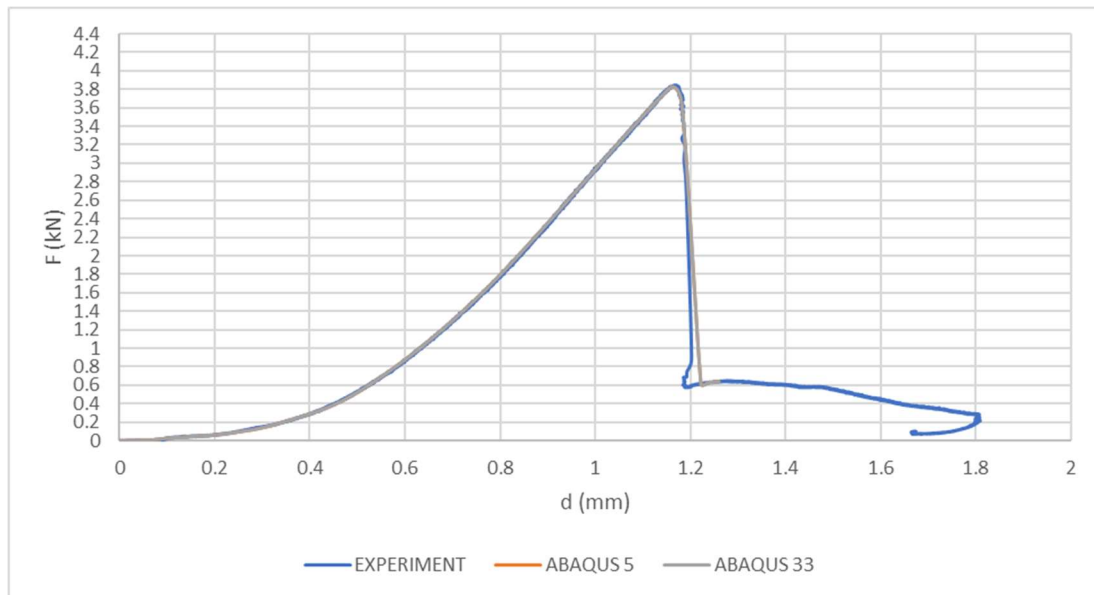
Εικόνα 4.5: Προσομοίωση ταχύτητας
Figure 4.5: Velocity simulation

Η θερμοκρασία δεν τέθηκε ως ξεχωριστή παράμετρος στη συγκεκριμένη προσομοίωση, καθώς ουσιαστικά έχει ληφθεί υπόψη στη θεώρηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των Wire Elements, αφού τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα εξαρτώνται από την εκάστοτε θερμοκρασία.

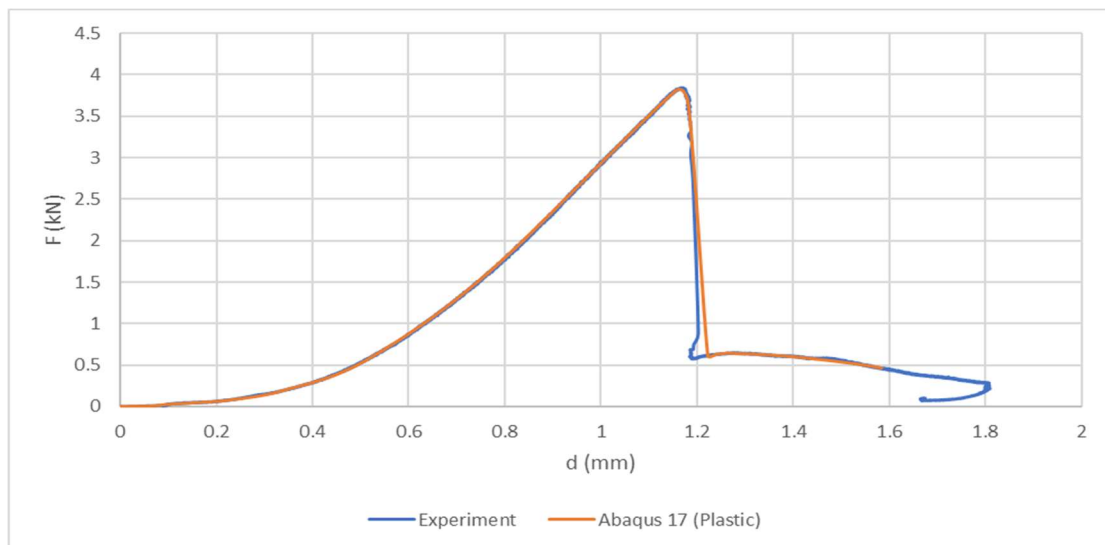
Η προσομοίωση του πρώτου πειράματος στους 23°C και για ταχύτητα 1mm/min παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.1, σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκαν δεκαεπτά (17) Wire Elements με σχέση δύναμης - μετατόπισης όπως αυτή προέκυψε πειραματικά. Στο Διάγραμμα 4.2 παρουσιάζονται, συγκριτικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πέντε (5) και τριάντα τρία (33) Wire Elements. Στο Διάγραμμα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση μετελαστικού κλάδου στο χάλυβα, σε σύγκριση με τα πειραματικά. Η απόκλιση και στις δύο περιπτώσεις είναι αμελητέα και τελικώς για την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν 17 Wire Elements, χωρίς μετελαστικό κλάδο. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων προσομοιώσεων παρατίθενται στο Παράρτημα Β στην ηλεκτρονική μορφή της παρούσας εργασίας.



Διάγραμμα 4.1: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων
Diagram 4.1: Comparison of experimental and numerical results



Διάγραμμα 4.2: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων
Diagram 4.2: Compared results using 5 and 33 Wire Elements

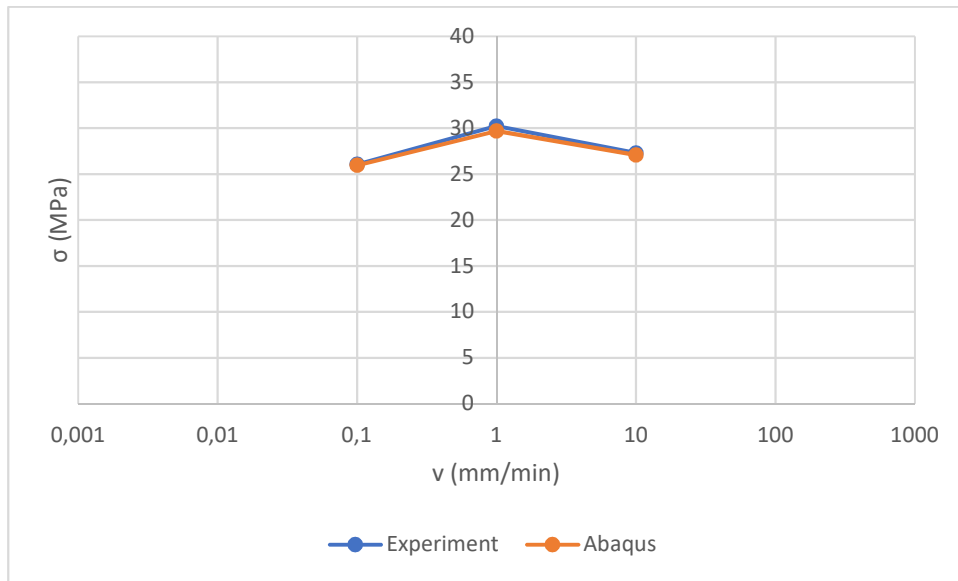


Διάγραμμα 4.3: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων με
 χρήση πλαστικού κλάδου
Diagram 4.3: Comparison of experimental and numerical results with plastic branch

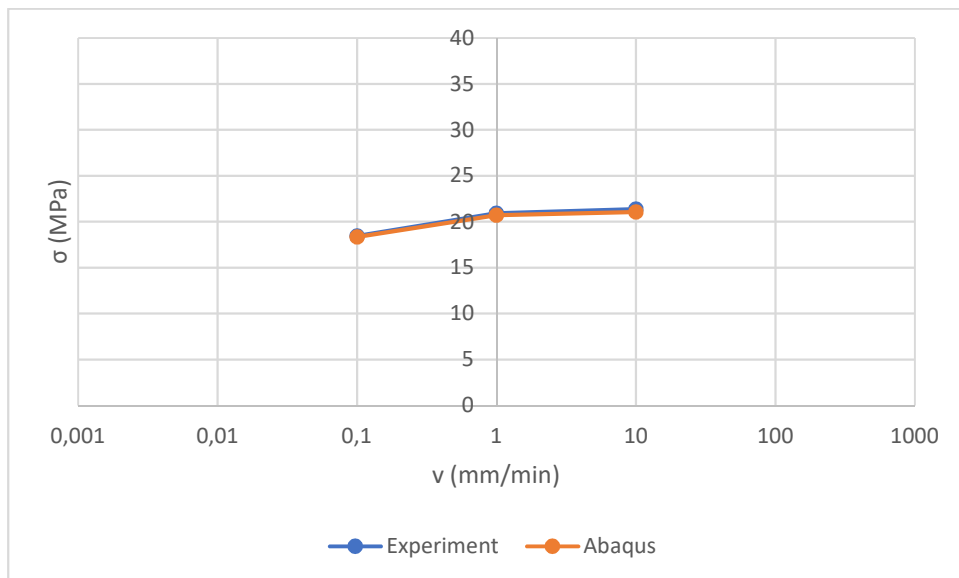
4.4.3 Τελικά αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

Από την εφαρμογή του μοντέλου, για κάθε μία θερμοκρασία παίρνουμε ένα διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης, βρίσκουμε τη μέγιστη ασκούμενη δύναμη και τη μετατρέπουμε σε τάση, όπως κάναμε και κατά την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων στο Κεφάλαιο 3.3.6. Στη συνέχεια ακολουθούμε πάλι την ίδια διαδικασία, δηλαδή λαμβάνουμε για κάθε θερμοκρασία τρεις (3) τιμές τάσης, ως μέσο όρο των τριών επαναλήψεων για κάθε ταχύτητα (συνολικά εννέα (9) τιμές) και χρησιμοποιώντας αυτό το μέσο όρο προκύπτει η ισόθερμη καμπύλη για κάθε

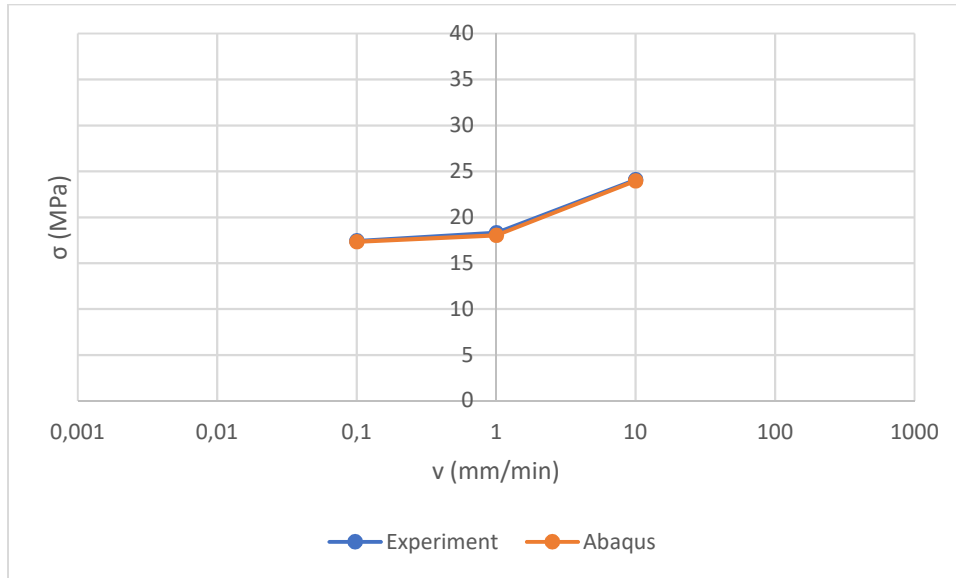
θερμοκρασία. Στα Διαγράμματα 4.4-4.11 παρουσιάζονται συγκριτικά, η αριθμητική και η πειραματική ισόθερμη καμπύλη.



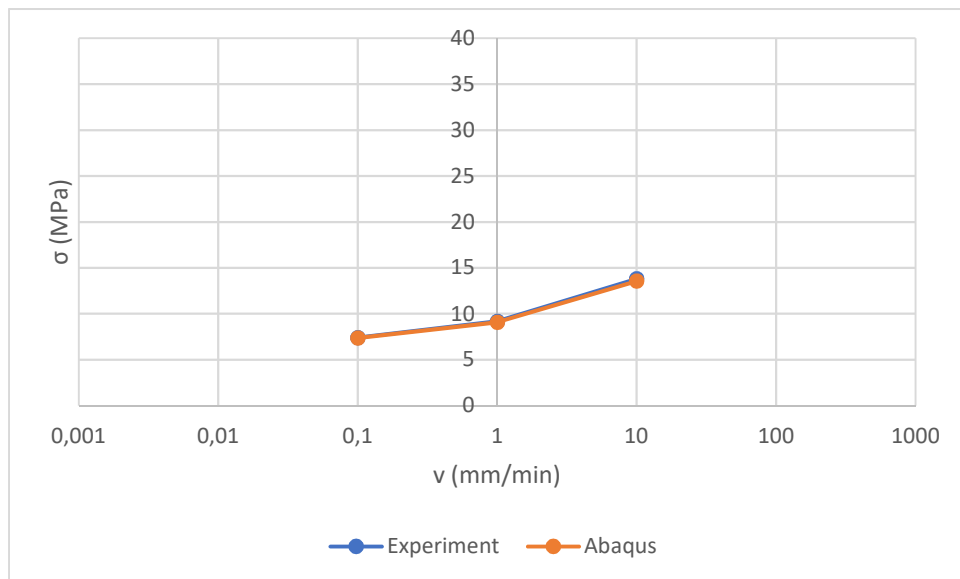
Διάγραμμα 4.4: Σύγκριση Ισόθερμων για -20°C
Diagram 4.4: Comparison of isothermal curves at -20°C



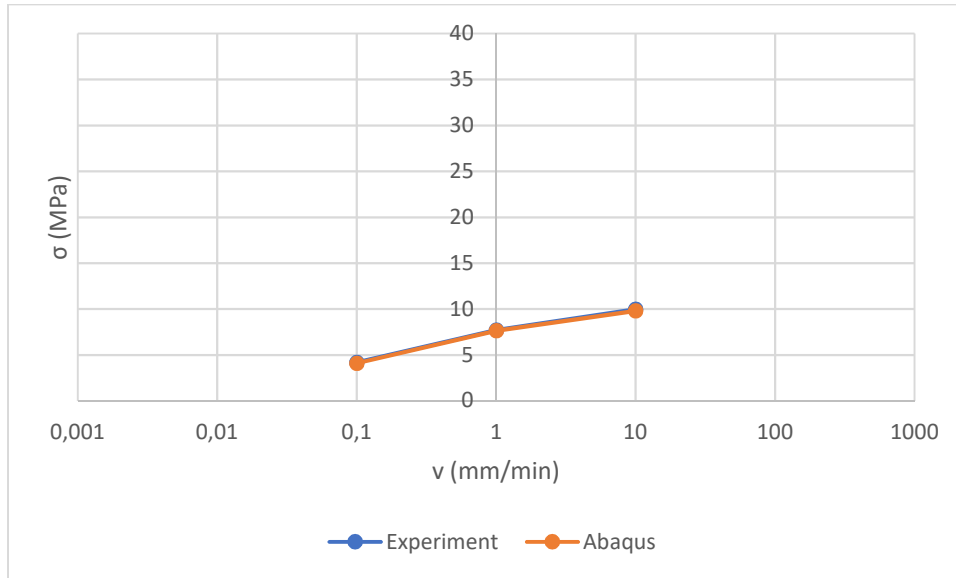
Διάγραμμα 4.5: Σύγκριση Ισόθερμων για 0°C
Diagram 4.5: Comparison of isothermal curves at 0°C



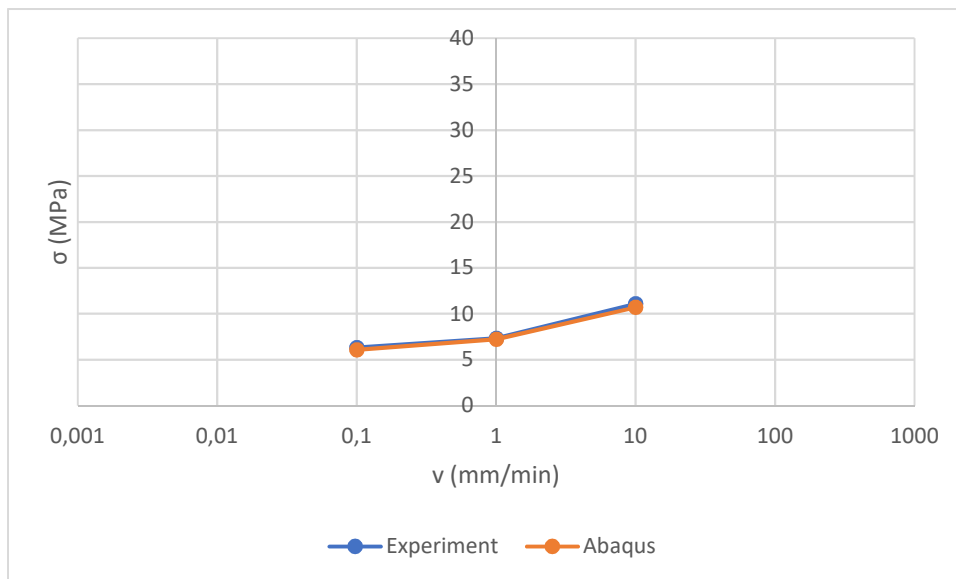
Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση Ισόθερμων για 10°C
Diagram 4.6: Comparison of isothermal curves at 10°C



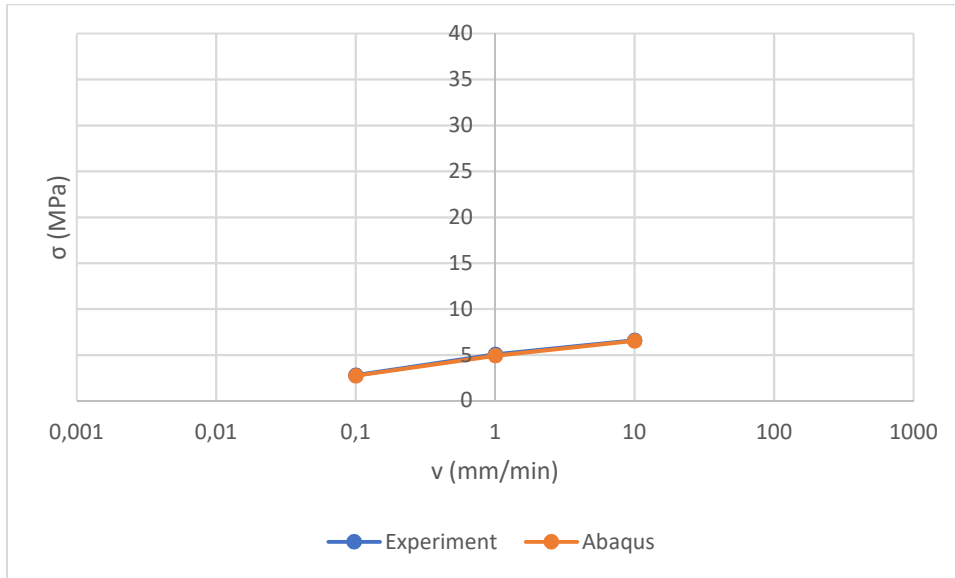
Διάγραμμα 4.7: Σύγκριση Ισόθερμων για 23°C
Diagram 4.7: Comparison of isothermal curves at 23°C



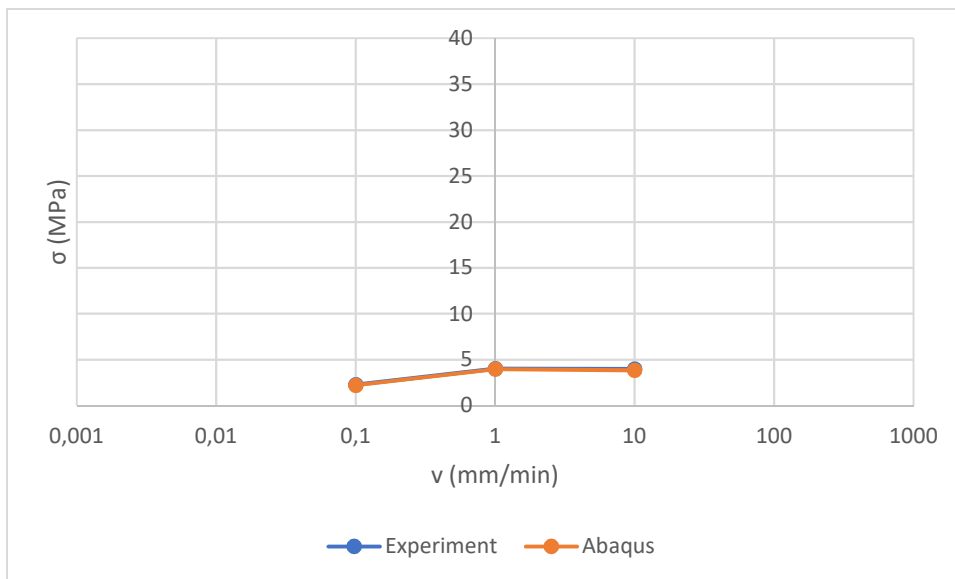
Διάγραμμα 4.8: Σύγκριση Ισόθερων για 40°C
Diagram 4.8: Comparison of isothermal curves at 40°C



Διάγραμμα 4.9: Σύγκριση Ισόθερων για 50°C
Diagram 4.9: Comparison of isothermal curves at 50°C



Διάγραμμα 4.10: Σύγκριση Ισόθερμων για 60°C
Diagram 4.10: Comparison of isothermal curves at 60°C



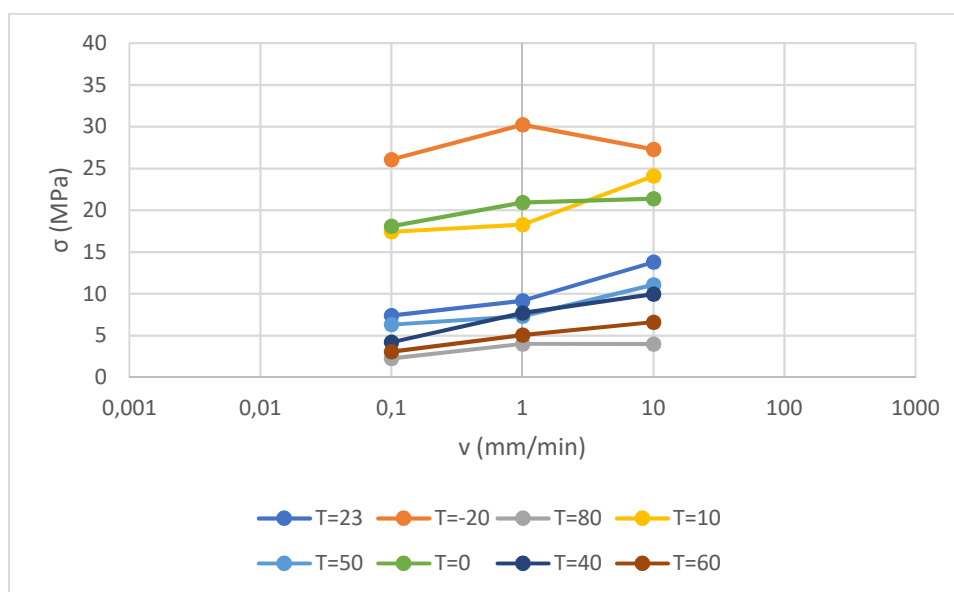
Διάγραμμα 4.11: Σύγκριση Ισόθερμων για 80°C
Diagram 4.11: Comparison of isothermal curves at 80°C

5. ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

5.1. Καμπύλη αναφοράς

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία για την κατασκευή της καμπύλης αναφοράς, όπως προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα και επιβεβαιώθηκε από την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου Abaqus.

Όπως έχει αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 2.3.1 η διαμόρφωση της καμπύλης αναφοράς εξαρτάται από τη θερμοκρασία αναφοράς. Στην παρούσα εργασία ως θερμοκρασία αναφοράς έχει επιλεγεί η θερμοκρασία δωματίου, δηλαδή 23°C. Συγκεντρωτικά οι ισόθερμες καμπύλες που προέκυψαν βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.1:



Διάγραμμα 5.1: Σύνολο ισόθερμων καμπύλων για τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες
Diagram 5.1: Isothermal curves for the temperatures considered

Για τη δημιουργία της καμπύλης αναφοράς θα εφαρμόσουμε κατ' αρχήν τη γραφική μέθοδο μετατόπισης των ισόθερμων καμπυλών για τις δύο ακραίες θερμοκρασίες (-20°C και 80°C) και στη συνέχεια τη Σχέση 2.4 των Williams-Landel-Ferry για τον προσδιορισμό της τελικής θέσης των ισόθερμων καμπυλών στην καμπύλη αναφοράς.

Ο προσδιορισμός των συντελεστών C_1 και C_2 είναι ιδιαίτερα απαιτητικός, καθώς απαιτούνται ειδικά πειράματα και διαδικασίες, που εκφεύγουν του περιεχομένου της παρούσας εργασίας. Για τη συγκεκριμένη κόλλα έχουν γίνει τα ανάλογα πειράματα και υπήρχαν προτεινόμενες τιμές, οι οποίες επιβεβαιώθηκαν με την εφαρμογή της γραφικής μεθόδου μετατόπισης των δύο ακραίων ισόθερμων καμπυλών (Πίνακας 5.1)

Πίνακας 5.1: Συντελεστές C_1 , C_2
Table 5.1: Coefficients C_1 , C_2

$C_1=$	31.20
$C_2=$	266.67

Εφαρμόζοντας τη σχέση των Williams-Landel-Ferry (2.4) για τις ανωτέρω τιμές των συντελεστών C_1 και C_2 υπολογίζονται οι τιμές των συντελεστών μετατόπισης a_T , βάσει των οποίων θα διαμορφωθεί τελικά η καμπύλη αναφοράς. Σημειώνεται ότι η γραφική μέθοδος προσδιορισμού των συντελεστών a_T , εφαρμόζεται μόνο στις ακραίες τιμές της καμπύλης αναφοράς, δηλαδή τους -20°C και 80°C . Οι υπόλοιπες τιμές για τις ενδιάμεσες θερμοκρασίες προκύπτουν υπολογιστικά από τη Σχέση 2.4. Η γραφική μέθοδος ουσιαστικά έχει ως στόχο τη δημιουργία μιας ενιαίας καμπύλης χωρίς κενά μεταξύ των ισόθερμων. Για το λόγο αυτό όσο πιο μεγάλο είναι το πλήθος των αποτελεσμάτων τόσο πιο ομαλή είναι η καμπύλη που θα προκύψει.

Πίνακας 5.2: Συντελεστές a_T για κάθε θερμοκρασία

Table 5.2: Coefficients a_T for each temperature

$T (^{\circ}\text{C})$	$\log a_T$
-20	6.00
10	1.60
23	0.00
50	-2.87
80	-6.40
0	2.94
60	-4.50
40	-2.30

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία της καμπύλης αναφοράς είναι η ακόλουθη: Οι ταχύτητες εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, δηλαδή 0.1 mm/min , 1 mm/min και 10 mm/min πολλαπλασιάζονται, για κάθε θερμοκρασία, επί τον αντίστοιχο συντελεστή μετατόπισης a_T . Για παράδειγμα, στη θερμοκρασία -20°C ισχύει $\log a_T = 6$, δηλαδή για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία ο συντελεστής μετατόπισης είναι $a_T = 10^6$. Άρα οι ταχύτητες εφελκυσμού σε αυτή τη θερμοκρασία πολλαπλασιάζονται επί αυτόν το συντελεστή. Με ανάλογη διαδικασία για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου:

Πίνακας 5.3: Τιμές ταχύτητας-τάσης βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων

Table 5.3: Velocity-stress values based on the experimental results

v (mm/min)	σ (Mpa)
3.98E-08	2.27
3.981E-07	4.02
3.981E-06	3.98
3.16E-05	5.07
0.000316228	6.61
0.000135355	6.32
0.001353549	7.34
0.10	7.41
1.00	9.16
10.00	13.80
39.71	18.30
88.09	20.92
880.98	21.39
8809.81	26.07
100000	30.23
1000000	30.23
10000000	27.29

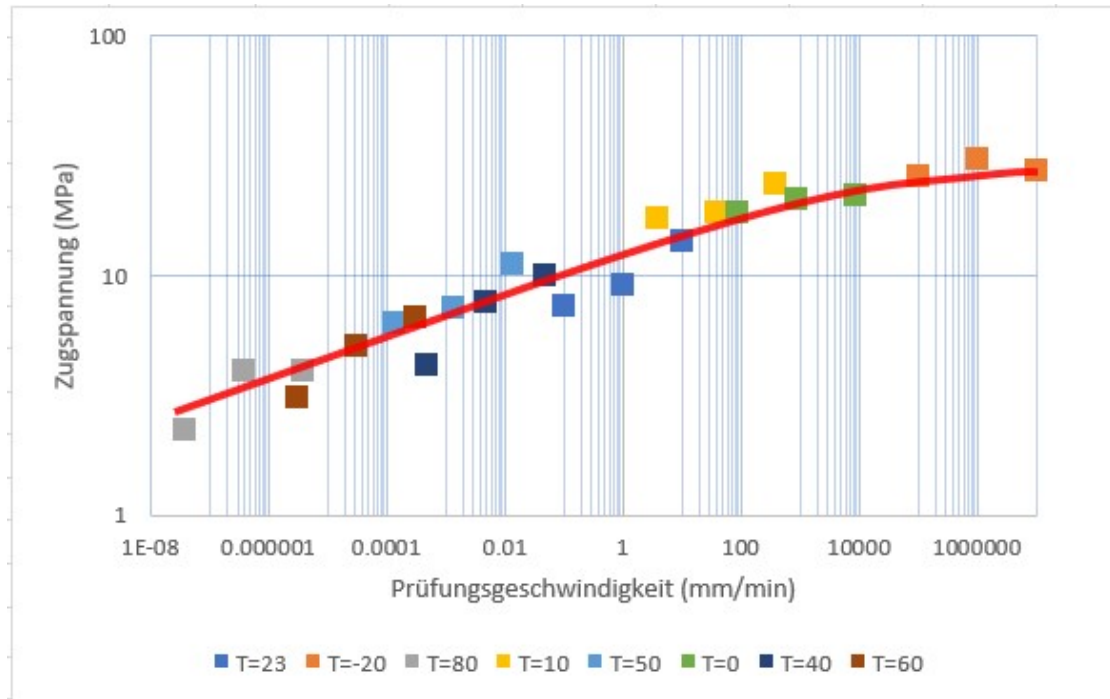
Πίνακας 5.4: Τιμές ταχύτητας-τάσης από την εφαρμογή του μοντέλου

Table 5.4: Velocity-stress values based on the numerical results

v (mm/min)	σ (Mpa)
3.98E-08	2.23
3.981E-07	3.97
3.981E-06	3.85
3.16E-05	4.94
0.000316228	6.55
0.000135355	6.07
0.001353549	7.23
0.10	7.37
1.00	9.09
10.00	13.57
39.71	18.04
88.09	18.34
880.98	20.72
8809.81	21.06
100000	25.96
1000000	29.69
10000000	27.09

Αφού υπολογιστεί ο συντελεστής μετατόπισης για κάθε θερμοκρασία και πολλαπλασιαστεί με την αντίστοιχη ταχύτητα προκύπτουν οι τελικές θέσεις των σημείων πάνω στη καμπύλη αναφοράς. Έγινε προσπάθεια για την επίτευξη της ομαλότερης δυνατής καμπύλης. Στο Διάγραμμα 5.2 παρουσιάζεται η καμπύλη αναφοράς που προέκυψε βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ στο Διάγραμμα 5.3 παρουσιάζονται συγκριτικά και οι δύο μητρικές καμπύλες, όπως αυτές προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα και από την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης. Παρατηρείται μια πολύ καλή προσαρμογή των δύο καμπύλων, υπάρχει δηλαδή σχεδόν ταύτιση των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Επί της ουσίας, η καμπύλη αναφοράς κάνει μια αντιστοίχιση της επίδρασης της θερμοκρασίας με την επίδραση της ταχύτητας εφελκυσμού στη συμπεριφορά της κόλλας. Δηλαδή, η συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες θεωρείται αντίστοιχη με τη συμπεριφορά σε υψηλές ταχύτητες (υψηλή αντοχή), ενώ αντίθετα η συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες είναι αντίστοιχη με αυτή σε χαμηλές ταχύτητες (χαμηλή αντοχή). Επομένως, διαθέτοντας τη καμπύλη αναφοράς της κόλλας που μελετήσαμε είμαστε πλέον σε θέση να γνωρίζουμε πως θα συμπεριφερθεί η συγκόλληση στην αντίστοιχη θερμοκρασία και ταχύτητα.



Διάγραμμα 5.2: Καμπύλη αναφοράς από πειραματικά αποτελέσματα
Diagram 5.2: Master Curve based on experimental results

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΥΘΕΝΑ

6.1. Συμπεράσματα

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί αυτόματα σε μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας της κόλλας, οδηγώντας σε μια όλκιμη θραύση. Αντίθετα, με τη μείωση της θερμοκρασίας αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας όπως και η αντοχή, με μόνο μειονέκτημα το ψαθυρό τρόπο αστοχίας. Επίσης παρατηρούμε ότι όσο βρισκόμαστε σε χαμηλές θερμοκρασίες (-20°C - 10°C) οι τιμές των αντοχών δεν παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις, ενώ αντίθετα στις υψηλές θερμοκρασίες οι διακυμάνσεις αυτές είναι αρκετά μεγαλύτερες. Συνεπώς, σε επόμενη εργασία θα ήταν σκόπιμο να υπάρχει πύκνωση των πειραμάτων στις πιο υψηλές θερμοκρασίες, για καλύτερη εκτίμηση της καμπύλης αναφοράς. Επιπλέον, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) της κόλλας, δε φάνηκε να επηρεάζει την πειραματική διαδικασία, δεδομένου ότι τα θερμοσκληραινόμενα υλικά δεν παρουσιάζουν απότομες μεταβολές των ιδιοτήτων τους γύρω από αυτή τη θερμοκρασία.

Όσον αφορά την επίδραση της ταχύτητας φόρτισης για σταθερή θερμοκρασία, από τα αποτελέσματα των πειραμάτων δε μπορούμε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα, καθώς η αύξηση της ταχύτητας δεν οδηγεί πάντα σε αύξηση της αντοχής. Αντίθετα όμως, από την αριθμητική καμπύλη αναφοράς που κατασκευάσαμε επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη συμπεριφορά της κόλλας, δηλαδή αυξημένη αντοχή με αύξηση της ταχύτητας φόρτισης. Γενικώς όμως, η χρήση κόλλας δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις εφελκυσμού, καθώς παρατηρούνται σχετικώς χαμηλές αντοχές.

Όσον αφορά το αριθμητικό μοντέλο, η επιλογή προσομοίωσης της κόλλας με Wire Elements και του χάλυβα με στοιχεία Solid οδηγεί σε πολύ καλά αποτελέσματα, καθώς η πειραματική καμπύλη αναφοράς σχεδόν ταυτίζεται με την αριθμητική ($r^2=0.98$). Μικρές αποκλίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων από τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου οφείλονται κυρίως σε αδυναμία του προγράμματος να εξάγει πολλές τιμές δύναμης-μετατόπισης και όχι σε προγραμματιστικό σφάλμα. Τα Wire Elements είναι κατάλληλα για την προσομοίωση μη γραμμικών συμπεριφορών, ενώ το πλήθος τους φαίνεται να μην επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα και κατά συνέπεια μεγαλύτερη πύκνωση των στοιχείων αυτών δεν δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα. Επιπλέον, η εισαγωγή μεταλλαστικού κλάδου στο μοντέλο δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα, καθώς η κόλλα φτάνει στο σημείο θραύσης της πολύ πιο σύντομα.

Καταλήγοντας, η κατασκευή της καμπύλης αναφοράς της κόλλας που μελετήθηκε, που αποτελούσε και το στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώθηκε επιτυχώς βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων και επαληθεύτηκε με την εφαρμογή αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης.

6.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί βάση για περαιτέρω έρευνα στον τομέα της χρήσης συγκολλητικών ουσιών σε έργα Πολιτικού Μηχανικού. Όπως έχουμε αναφέρει (Κεφάλαιο 1.1) για να εδραιωθεί η χρήση κόλλας ως μέθοδος συγκόλλησης στις μεταλλικές κατασκευές θα πρέπει πρώτα να ενταχθούν στους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς μέθοδοι υπολογισμού της αντοχής της εκάστοτε κόλλας.

Για το σκοπό αυτό κρίνεται απαραίτητη η μελέτη και άλλων συγκολλητικών ουσιών, πέραν αυτής που εξετάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκειμένου να εξαχθούν οι αντίστοιχες καμπύλες αναφοράς. Οι καμπύλες αυτές θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε κόλλας, ώστε ο πελάτης-χρήστης να γνωρίζει τις αντοχές της και αναλόγως τις αναμενόμενες ταχύτητες φόρτισης της κατασκευής να επιλέγει την πλέον κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Επόμενος στόχος πρέπει να είναι η δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που δεν θα απαιτεί πειραματικά αποτελέσματα ως δεδομένα εισόδου, αλλά με την αλλαγή κάποιων χαρακτηριστικών της κόλλας που θέλουμε να προσομοιώσουμε, όπως π.χ. το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης ή η δυσκαμψία της να μπορούμε να προβλέπουμε τη συμπεριφορά της. Είναι βασικό δηλαδή να προβλέπουμε τις αντοχές και την πραγματική συμπεριφορά μιας κόλλας χωρίς να είναι απαραίτητο να διεξάγουμε εργαστηριακές δοκιμές, προκειμένου με τον τρόπο αυτό να έχουμε άμεσα αποτελέσματα και με μικρότερο κόστος.

Απαραίτητη τέλος προϋπόθεση, για την προώθηση της χρήσης συγκολλητικών ουσιών στις μεταλλικές κατασκευές είναι η διαμόρφωση και εισαγωγή στους Ευρωκώδικες, μίας σχέσης για τον υπολογισμό της αντοχής τους με τη γενική μορφή:

$$F_{K,Rd} = f(d, T, A) \quad (6.1)$$

όπου d το πάχος του συγκολλητικού στρώματος, T η θερμοκρασία εφαρμογής και A η επιφάνεια συγκόλλησης.

Η διαμόρφωση μιας τέτοιας σχέσης αποτελεί επίπονη διαδικασία και δεν είναι εύκολο να ολοκληρωθεί, καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί η αντοχή μιας κόλλας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και για το λόγο αυτό απαιτείται η εισαγωγή αυστηρών συντελεστών ασφαλείας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ντόντος Α. (2012). «Συνθετικά Μακρομόρια, Βασική Θεώρηση». Εκδόσεις Κωσταράκης, Αθήνα.
2. Παναγιώτου Κ. (2000). «Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών». Εκδόσεις Πήγασος, Θεσσαλονίκη.
3. Bikales N.(1971). ‘‘Characterization of Polymers’’. WILEY INTERSCIENCE.
4. Cowie J.M.G. (1991) ‘‘Polymers: Chemistry & Physics of modern materials’’, Blakie, London.
5. Ciupack Y., Pasternak H et. al. IGF-No. 18161BG (2017). ‘‘Adhesive bonding in steel construction - Challenge and innovation’’. Chair of Steel and Timber Structures, BTU, Konrad-Wachmann-Allee 2, 03046 Cottbus, Germany.
6. DIN EN 15870, Adhesives – Determination of tensile strength of butt joint (ISO 6922:1987, modified), German version EN 15870-2009.
7. FOSTA_Forschungsbericht_20180410
8. Habenicht G. (2009). ‘‘KLEBEN, Grundlagen, Technologien, Anwendungen’’. Springer.
9. ABAQUS Manual:
<http://abaqus.software.polimi.it/v6.12/books/usi/default.htm>
10. Julabo: The Temperature Control Company
<https://www.julabo.com/en/products/refrigerated-circulators/refrigerated-heating-circulators/f32-me-refrigerated-heating-circulator>
11. LORD® 410 Acrylic Adhesive
<https://www.lord.com/products-and-solutions/adhesives/lord-410-acrylic-adhesive>