

Contributions to characterisation of galvanic platings

Part II: Ductility and Flexibility

Zur Charakterisierung galvanischer Schichten

Teil II: Duktilität und Flexibilität

By Dr. sc. nat. Thomas Allmendinger, Glattbrugg/Schweiz

1 Introduction and definitions

First of all, it should be distinguished between sheets or plates on one hand and layers or platings on the other hand. A *sheet* or a *plate* consists of a homogeneous material being ordinarily generated not electrochemical or electroless plated, whereas a *layer* or a *plating* is in every case deposited on a sheet, the layer being considerably thinner than the sheet.

The term *elongation* suggests the result of a linear tension. However, it has to be distinguished between a mere *elongation* E and the *ductility* D , defined as the maximum possible elongation without the generation of tears. When a sheet or a plated sheet is bended over a cylindrical body such as a rounded bar or a tube, an elongation is induced, too. However, this elongation is not equable but concentrated on the outer range (periphery) of the sheet. If an additional (galvanic) layer is applied to the outer surface of the sheet, this layer is extended in the same degree as the periphery of the plate is extended, depending on the bend radius of the cylinder. Thus, in principle it is possible to determine the ductility of a galvanic layer by a series of bend tests whereby the bend radius is diminished as far as tears are visible under the microscope. Below, the calculation formula for the elongation is derived on base of a simple physical model.

In the context of the bend test the term of the *flexibility* F arises, too, since an extension occurs as a result of any bending. However, while the criterion of ductility is feasible on sheets as well as on layers, the criterion of flexibility is solely significant for sheets or for plated sheets since the flexibility – contrary to the ductility – depends also on the sheet-thickness. That can easily be shown and mathematically formulated by means of the same physical model. Thereby, the correlations being evi-

1 Einleitung und Definitionen

Vorab sei hier unterschieden zwischen Platte, Folie oder Blech und Schicht oder Beschichtung. Eine *Platte* besteht aus einem homogenen Material und wird in der Regel nicht galvanisch erzeugt, während eine *Schicht* stets auf eine Platte aufgebracht und normalerweise erheblich dünner ist.

Wenn man von *Dehnung* spricht, so denkt man zunächst an das Resultat einer linearen Zugbeanspruchung. Dabei ist zu unterscheiden zwischen einer bloßer *Dehnung* E (= Elongation) und der *Dehnbarkeit* D (= Duktilität), definiert als die maximal mögliche Dehnung ohne Rissbildung. Biegt man eine Platte bzw. eine beschichtete Platte über eine Stange oder über ein Rohr, so erfolgt ebenfalls eine Dehnung, wenn auch eine ungleichmäßige, auf den Außenbereich der Platte konzentrierte. Ist auf diesem Außenbereich eine galvanische Schicht vorhanden, so wird diese entsprechend gedehnt, und zwar je nach Biegeradius mehr oder weniger stark. Somit ist es im Prinzip möglich, anhand einer Reihe von Biegetests die Duktilität einer galvanischen Schicht zu ermitteln: Man verringert den Biegeradius solange, bis unter dem Mikroskop erste Risse sichtbar werden. Anschließend wird die Berechnungsformel für die Dehnung aufgrund eines einfachen physikalischen Modells hergeleitet.

Im Zusammenhang mit dem Biegetest taucht auch der Begriff der *Flexibilität* F (Biegebarkeit) auf, und zwar deshalb, weil beim Biegen stets auch eine Dehnung erfolgt. Während aber das Kriterium der Duktilität auf Platten wie auch auf Schichten anwendbar ist, macht dasjenige der Flexibilität lediglich bei Platten bzw. bei beschichteten Platten Sinn, und zwar deshalb, weil die Flexibilität im Gegensatz zur Duktilität auch von der (Platten-) Dicke abhängt. Dies lässt sich einfach anhand desselben physikalischen Modells herleiten und auch mathe-

dent from this model are not only useful for the calculations of physically adequate numerical values but likewise for an improved comprehension of the different influences.

2 Physical model for the ductility and for the flexibility

The model proposed here employs a flat plate being extended making the boundary condition that the volume of this plate is not affected by the extension, i.e. that the material is neither compressible nor enlargeable due to a formation of tears. In addition, it is assumed that the change of the thickness is approximately equable over the whole considered range meaning that the extended plate exhibits the same thickness at its ends as at its centre. *Figure 1* shows such a flat plate in the longitudinal section, l_0 and d_0 marking the length and the thickness, respectively, in the unstressed state and l_{\max} and d_{\min} the length and the thickness in the stressed state, especially in the maximum possible stressed state where no tears are formed. Therefore it is assumed here that the tension due to the traction is one-dimensional.

As already mentioned, the volume of the plate – and thus its longitudinal area – is in the stressed state the same as in the unstressed state. Therefore it is

$$d_0 \cdot l_0 = d_{\min} \cdot l_{\max} \quad <1>$$

If the ratio l_{\max}/l_0 is defined as the *ductility* D , one gets

$$D = l_{\max}/l_0 = d_0/d_{\min} \quad <2a>$$

respectively

$$d_{\min} = d_0/D \quad <2b>$$

The ductility term may also be expressed in percents.

This equation being valid for the flat case shall now be brought in relation to the case where the corresponding section of the plate is bended. *Figure 2* shows such an – originally flat – plate which has been bended over a rounded body where r_{\min} marks

matisch formulieren, wobei die daraus ersichtlichen Zusammenhänge nicht nur zur Berechnung von physikalisch fundierten Zahlenwerten dienen, sondern auch zum besseren Verständnis der verschiedenen Einflüsse beitragen.

2 Physikalisches Modell zur Duktilität und zur Flexibilität

Dem hier auf den Fall einer Platte angewandten Modell liegt die Annahme zu Grunde, dass sich das Volumen dieser Platte bei einer Dehnung nicht verändert, d.h. dass das Material weder kompressibel ist, noch dass es sich infolge Rissbildung erweitern kann. Außerdem wird näherungsweise angenommen, dass eine Dickenänderung gleichmäßig über den gesamten betrachteten Bereich erfolgt, d.h. dass die gedehnte Platte an den Enden gleich dick ist wie im Zentrum. In *Abbildung 1* ist eine ebene Platte im Längsschnitt dargestellt, wobei l_0

bzw. d_0 die Länge bzw. Dicke im unbeanspruchten Zustand und l_{\max} bzw. d_{\min} die Länge bzw. Dicke im gestreckten Zustand bedeuten, und zwar speziell im maximal möglichen, ohne dass irgend eine Rissbildung erfolgt. Dies entspricht dem Fall, dass die Dehnung eindimensional ist, wobei eine Zugspannung angewandt wird.

Wie erwähnt, sei das Volumen der Platte – und damit auch die Längsschnittfläche – im ungestreckten Zustand gleich wie im gestreckten. Also gilt

$$d_0 \cdot l_0 = d_{\min} \cdot l_{\max} \quad <1>$$

Wenn man das Verhältnis l_{\max}/l_0 als die *Duktilität* D definiert, so gilt

$$D = l_{\max}/l_0 = d_0/d_{\min} \quad <2a>$$

bzw.

$$d_{\min} = d_0/D \quad <2b>$$

Die Duktilität lässt sich ohne weiteres auch in Prozenten ausdrücken.

Diese für den ebenen Fall geltende Beziehung soll nun in Relation gebracht werden zum Fall, wo die Platte gebogen ist. In *Abbildung 2* wird hierzu der ursprünglich flache Plattenausschnitt als gebogen betrachtet, wobei r_{\min} den minimal erforderliche

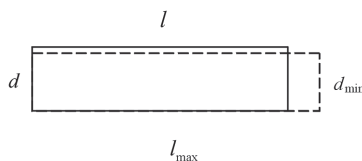


Fig. 1: Definition of used parameters

Abb. 1: Definition der verwendeten Größen

the minimally admissible bend radius guaranteeing no tears. In this case, a 90°-angle is chosen (however, the calculation yields the same result for any other angle). The dotted line marks the real course of surface though it is not consid-

ered here because of the reduction made within this model that the thinning of the plate is assumed to be equable over the whole extended range.

Since the inner area (in *Figure 2*, lying underneath) has the same length before and after bending, hence

$$l_0 = 2\pi r_{\min} / 4 \quad <3>$$

the longitudinal area before bending is

$$F_{\text{lsv}} = 2\pi r_{\min} d_0 / 4 \quad <4>$$

and the longitudinal area after bending is

$$F_{\text{lsn}} = \pi R_{\min}^2 / 4 - \pi r_{\min} / 4 \quad <5>$$

whereby

$$R_{\min} - r_{\min} \cong d_{\min} \rightarrow R_{\min} \cong r_{\min} + d_{\min} \quad <6>$$

Equating the areas from equation <4> and <5> and considering the *relation* <6> delivers

$$2r_{\min} d_0 = 2r_{\min} d_{\min} + d_{\min}^2 \quad <7>$$

Now d_{\min} can be expressed by the ductility D using equation <2b>, yielding

$$r_{\min} = d_0 / (2(D-1)) \quad <8>$$

This equation expresses a connection – due to the ductility – between the minimally required bend radius r_{\min} and the thickness d_0 of the plate, suggesting the definition of the flexibility F as the quotient of these two terms:

$$F = d_0 / r_{\min} = 2(D-1) \quad <9>$$

Thus the *flexibility* F of a sheet or a plate is a material-specific dimensionless number depending on the – likewise dimensionless – ductility D . It provides the ratio between a certain freely eligible sheet-thickness and the minimally required bend radius. If the sheet is galvanically plated the total thickness (sheet + plating) has to be considered, chiefly the sheet-thickness. In the latter case the sheet is required to be more ductile than the plating.

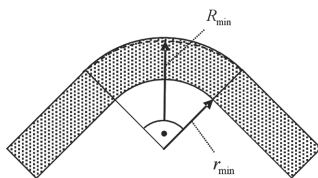


Fig. 2: Parameters in case of bending

Abb. 2: Größen beim Biegen der Probe

Biegeradius darstellt, ohne dass Risse entstehen. Gewählt ist hier ein 90°-Winkel (die Rechnung ergibt indessen dasselbe Resultat für jeden anderen Winkel). Gestrichelt eingezeichnet ist der reale Verlauf der Außenfläche. Er soll hier aber der Einfachheit halber nicht berücksichtigt werden, denn diesem Modell

liegt, wie gesagt, die Annahme zu Grunde, dass die Verdünnung der Schicht im Biegebereich überall gleich groß ist.

Weil die nach dem Biegen vorhandene Innenlänge (in *Abbildung 2* unten liegend) gleich lang ist wie vor dem Biegen, weil also

$$l_0 = 2\pi r_{\min} / 4 \quad <3>$$

ist die Längsschnittfläche vor dem Biegen

$$F_{\text{lsv}} = 2\pi r_{\min} d_0 / 4 \quad <4>$$

und die Längsschnittfläche nach dem Biegen

$$F_{\text{lsn}} = \pi R_{\min}^2 / 4 - \pi r_{\min} / 4 \quad <5>$$

wobei

$$R_{\min} - r_{\min} \cong d_{\min} \rightarrow R_{\min} \cong r_{\min} + d_{\min} \quad <6>$$

Setzt man die beiden Flächen aus Gleichung <4> und <5> gleich und berücksichtigt man noch die *Beziehung* <6>, so erhält man

$$2r_{\min} d_0 = 2r_{\min} d_{\min} + d_{\min}^2 \quad <7>$$

Drückt man jetzt d_{\min} mit der Duktilität D gemäß Gleichung <2b> aus, so erhält man

$$r_{\min} = d_0 / (2(D-1)) \quad <8>$$

Diese Gleichung drückt einen durch die Duktilität gegebenen Zusammenhang aus zwischen dem minimal erforderlichen Biegeradius r_{\min} sowie der Schichtdicke d_0 und legt die Definition der Flexibilität F als Quotient dieser beiden Größen nahe:

$$F = d_0 / r_{\min} = 2(D-1) \quad <9>$$

Die *Flexibilität* F einer Schicht ist somit eine stoffspezifische, dimensionslose Zahl, welche von der – ebenfalls dimensionslosen – Duktilität D abhängt. Sie ergibt das Verhältnis einer bestimmten, im Prinzip frei wählbaren Schichtdicke zum dazu minimal erforderlichen Biegeradius. Bei galvanischen Schichten ist mit der Gesamtschichtdicke (Unterlage + Schicht) zu rechnen, im Wesentlichen also mit der Dicke der Unterlage. Voraussetzung ist, dass die Unterlage duktiler ist als die Schicht.

2.1 Example

The ductility of a layer is assumed to be 1.05 (i.e. the layer is 5 percent ductile; determination see next chapter). Thus the resulting flexibility is 0.1. When the thickness of the plate or the sheet on which the layer is deposited comes to 0.5 mm, the minimal bend radius is 5 mm. On the other hand, when the thickness of the plate is 1 mm the minimal bend radius gets 10 mm, i.e. twice as large.

According to this model, the ductility does not depend on the thickness of the plate. As mentioned initially, this is not exactly the case with real plates since the thickness within the bending range is not constant. However, the simplicity of the model justifies its application when the boundary conditions are regarded.

3 Determination of ductility by the bend test

The galvanic layer which has to be tested is deposited on a metallic sheet. This sheet is bended over a rounded body (= counter part) using a rectangular stamp with a defined radius (= pressing angle part), the involved sliding surfaces being covered if necessary with a lubricant. Thereby, the plated surface of the sheet is extended providing an elongation E being dependant on the bend radius r . The device is schematically showed in *Figure 3* wherein R marks the outer radius, being reduced a little due to the elongation.

For the calculation, the same assumptions and simplifications are made as above whereby the layer thickness may normally be neglected in view of the thickness of the sheet, thus the equations $r_{\min} = r$, $R_{\min} = R$ and $d_0 = d$ may be made.

However, this procedure solely allows the determination of the elongation E . The ductility D must be determined running several bend tests. This can be done with several sheet samples. Yet, it is possible using only one sample starting with a large bend radius and successively diminishing it until no tears

2.1 Beispiel

Die Duktilität einer Schicht sei 1,05 (d.h. die Schicht ist um 5 % dehnbar; Bestimmung siehe nächstes Kapitel). Daraus ergibt sich eine Flexibilität von 0,1. Falls die Dicke der Platte bzw. des Blechs, auf welcher die Schicht aufgebracht ist, 0,5 mm beträgt, so ist der minimale Biegeradius 5 mm. Falls die Plattendicke hingegen 1 mm beträgt, so wird der minimale Biegeradius 10 mm, also doppelt so groß.

Gemäß diesem Modell ist die Duktilität unabhängig von der Dicke der Schicht. Wie bereits eingangs erwähnt, ist dies bei realen Schichten nicht der Fall, weil die Dicke im Dehnungsbereich nicht gleichmäßig verläuft. Die Einfachheit des Modells rechtfertigt jedoch seine Anwendung, sofern man sich der Randbedingungen bewusst ist.

3 Biegetest zur Bestimmung der Duktilität

Die zu prüfende galvanische Schicht wird auf ein Metallblech (Prüfblech) abgeschieden. Anschließend wird jenes mittels eines rechtwinkligen Stempels (Presswinkel) über einen Einsatz (Gegenstück) mit definiertem Radius gebogen, wobei die der Reibung ausgesetzten Oberflächen gegebenenfalls mit einem Gleitmittel zu versehen sind. Dadurch dehnt sich die beschichtete Oberfläche dieses Metallblechs aus, wobei die Dehnung E vom Biegeradius r abhängt. Die Vorrichtung ist in *Abbildung 3* schematisch gezeigt, wobei mit R der infolge der Dehnung etwas reduzierte Außenradius gemeint ist.

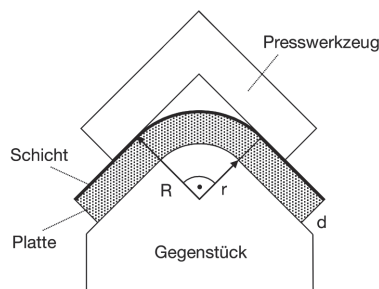


Fig. 3: Definition of used parameters

Abb. 3: Definition der verwendeten Größen

Zur Berechnung werden dieselben Annahmen bzw. Vereinfachungen gemacht wie oben, wobei die Schichtdicke gegenüber der Plattendicke normalerweise vernachlässigt werden kann und $r_{\min} = r$, $R_{\min} = R$ sowie $d_0 = d$ gesetzt werden kann.

Allerdings geht es hier um die Berechnung der Dehnung E . Die Dehnbarkeit (Duktilität) D muss durch mehrere Messungen ermittelt werden. Dies kann mit mehreren Probeblechen und Einsätzen mit verschiedenen Radien gemacht werden, ist aber auch mit einem einzigen Probenblech möglich,

are visible under the microscope (amplification preferably 500x).

Equating the two areas according to the relations <4> and <5> delivers the expression

$$R = \sqrt{r^2 + 2d \cdot r} \quad <10>$$

Thereby r means the bend radius and d the sample thickness (strictly speaking the sum of the sheet plus the layer).

Since the bend lengths exhibit the same ratio as the radii, the elongation then gets

$$E = (R - r) / r \quad <11a>$$

or in percents:

$$E = 100 \cdot (R - r) / r \% \quad <11b>$$

4 Comparison with ASTM-norm B 489 – 85

In the ASTM B 489 – 85 (reapproved 2003), in principle the same practice is proposed. However, the English term *mandrel*, which is employed there, is not clear and not unambiguous since no figure is appended. Probably, a rounded body such as the counterpart in *Figure 3* is supposed. The calculation formula in this ASTM-norm is given by:

$$E = 100 \cdot (T / (D + T)) \% \quad <12>$$

with T = total thickness of basis metal and deposit
 D = diameter of the mandrel

Poor deviations to given equation <11b> arise from approach above of neglecting the thickness of the layer and of solely considering the thickness of the sheet. Furthermore, the ASTM-norm does not consider the fact that the thickness is diminished due to the bending. However, an aggravating deviation is due to the different parameters being used: in the present case, the radius of the counterpart is taken whilst in the ASTM-norm its diameter is taken, leading to a deviation of approximately factor two (as it is obvious in the *Table 1*). If the first is true, it must be concluded that the values given hitherto on base of this bend test indeed are considerable larger than assumed.

indem man nämlich bei einem großen Biegeradius beginnt und diesen sukzessive verkleinert, bis unter dem Mikroskop Risse sichtbar werden (Vergrößerung vorzugsweise 500fach).

Durch Gleichsetzen der beiden Flächen gemäß den Gleichungen <4> und <5> und Auflösen nach R erhält man:

$$R = \sqrt{r^2 + 2d \cdot r} \quad <10>$$

wobei r den Biegeradius und d die Probendicke (genau genommen die Summe von Beschichtungsblech + Schichtdicke) bezeichnen.

Da sich die Bogenlängen proportional zu den Radien verhalten, beträgt die Dehnung dann

$$E = (R - r) / r \quad <11a>$$

bzw. in Prozent ausgedrückt:

$$E = 100 \cdot (R - r) / r \% \quad <11b>$$

4 Vergleich mit der ASTM-Norm B 489 – 85

In der ASTM-Norm B 489 – 85 (Reapproved 2003) wird im Prinzip dasselbe Vorgehen vorgeschrieben, wobei der dort verwendete englische Begriff *mandrel* für das Gegenstück etwas unklar ist. Die wörtliche Übersetzung hierfür lautet nämlich *Dorn*. Gemeint ist aber höchstwahrscheinlich ein Gebilde, wie es als *Gegenstück* in *Abbildung 3* skizziert ist. Die – in der ASTM-Norm nicht hergeleitete – Berechnungsformel lautet:

$$E = 100 \cdot (T / (D + T)) \% \quad <12>$$

mit: T = totale Dicke von Platte und Schicht
 D = Durchmesser des *mandrels*

Geringfügige Abweichungen von *Gleichung* <11b> ergeben sich einerseits daraus, dass bei der ASTM-Norm die Schichtdicke zur Plattendicke addiert wird, während sie im hier beschriebenen Fall vernachlässigt wird. Andererseits wird dort die Verringerung der Schichtdicke infolge Dehnung nicht berücksichtigt. Eine gravierende Abweichung entsteht indessen daraus, dass im hier dargelegten Fall der Radius des Gegenstücks verwendet wird, bei der ASTM-Norm hingegen dessen Durchmesser. Dadurch ergeben sich Abweichungen etwa um den Faktor Zwei (*Tab. 1*). Falls letzteres stimmt, so wurde bei einer herkömmlichen Angabe der Duktilität aufgrund von Biegetests stets mit einer zu kleinen Dehnung gerechnet, d.h. die Dehnung war effektiv wesentlich größer als angenommen.

The ASTM-formula <12> relates to the case where the sheet is compressed inside. Such an effect may occur in some rare cases leading to a wavy surface, but it should not be the basic assumption of an – idealized – physical model of thought. It would mean that during a bending something profoundly different happens than during stretching. And it would mean, as a consequence, that the bend test would not be suitable for determining the ductility of a layer.

Tab. 1: Comparison of values for elongation

Bend rad. (mm)	Thickn. (mm)	Outer rad. (mm)	elongation E (%)	
			eq. <11b>	ASTM
3.0	1.0	3.87	29.1	14.3
4.5	1.0	5.41	20.2	10.0
5.0	1.0	5.92	18.3	9.1
6.0	1.0	6.93	15.5	7.7
8.0	1.0	8.94	11.8	5.9
10.0	1.0	10.95	9.5	4.8
3.0	0.5	3.46	15.5	7.7
4.5	0.5	4.97	10.6	5.3
5.0	0.5	5.48	9.5	4.8
6.0	0.5	6.48	8.0	4.0
8.0	0.5	8.49	6.1	3.0
10.0	0.5	10.49	4.9	2.4

Regarding these considerations, the demand is intelligible that, within information or publications concerning the ductility, always the determination method as well as the calculation formula should be mentioned.

Die ASTM-Formel <12> entspricht dem Fall, bei dem die Platte beim Biegetest innenseitig zusammengestaucht wird. Eine solche Stauchung mag zwar in seltenen Fällen vorkommen – wobei die Oberfläche wellig wird –, darf aber einem – idealisierten – physikalischen Dehnungsmodell nicht zugrunde liegen. Denn sie würde bedeuten, dass bei einer Biegung etwas grundsätzlich Anderes passiert als bei einer Streckung. Wenn dem so wäre, so wäre die Dehnbarkeit nicht über einen Biegetest ermittelbar.

Tab. 1: Vergleich der Dehnungswerte

Biegerad. (mm)	Dicke (mm)	Außenrad. (mm)	Dehnung E (%)	
			Gl. <11b>	ASTM
3,0	1,0	3,87	29,1	14,3
4,5	1,0	5,41	20,2	10,0
5,0	1,0	5,92	18,3	9,1
6,0	1,0	6,93	15,5	7,7
8,0	1,0	8,94	11,8	5,9
10,0	1,0	10,95	9,5	4,8
3,0	0,5	3,46	15,5	7,7
4,5	0,5	4,97	10,6	5,3
5,0	0,5	5,48	9,5	4,8
6,0	0,5	6,48	8,0	4,0
8,0	0,5	8,49	6,1	3,0
10,0	0,5	10,49	4,9	2,4

In Anbetracht dieser Überlegungen liegt die Forderung nahe, dass bei der Mitteilung bzw. Publikation von Messresultaten jeweils stets die angewandte Methode wie auch die verwendete Berechnungsformel anzugeben ist.

Kontakt

Collini AG, CH-8600 Dübendorf; Internet: <http://www.collini.eu>